

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

# **Drsnost povrchu při frézování nakloněným nástrojem**

Surface Roughness during Milling by  
Means of Tilt of Milling tool

Student:

Bc. Pavel Hýbl

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2010

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Hýbl**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Téma: **Drsnost povrchu při frézování nakloněným nástrojem**  
**Surface Roughness during Milling by Means of Tilt of Milling tool**

### Zásady pro vypracování:

1. Přehled současněho stavu frézování tvarových ploch.
2. Zhodnocení a rozbor frézování tvarových ploch se zaměřením na parametry struktury povrchu.
3. Aplikace nové technologie výroby.
4. Technicko – ekonomický přínos navrhovaného řešení.
5. Závěry pro realizaci v praxi.

### Seznam doporučené odborné literatury:

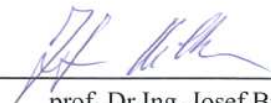
BÁTORA, B.; VASILKO, K.. *Obrobené povrchy – technologická dedičnost, funkčnost*. Trenčín: Trenčianská univerzita, 2000. s 183, ISBN 80-88914-19-1.  
SADÍLEK, M. *Zvyšování efektivity obrábění s využitím CAD/CAM systému-Disertační práce*. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 123 stran, 23 příloh.  
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábani*. Žilina: EDIS Žilina. 2007, 243s. ISBN 978-80-8070-711-8.  
SADÍLEK, M.; ČEP R.; OTÁHAL, D. Vliv náklonu nástroje při frézování. *Odborná konference - Frézování IV*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, s. 13 – 18. ISBN 80-214-3239-X.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010

  
prof. Dr. Ing. Josef Brychta  
vedoucí katedry

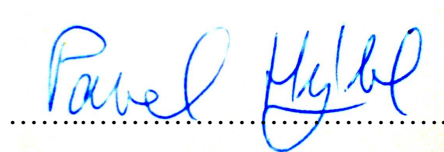


  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### ***Prohlášení studenta***

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ...10.5.2010.....



podpis studenta

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.

- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě ...10.5.2010.....



Bc. Pavel Hýbl

Adresa trvalého pobytu studenta: **Bc. Pavel Hýbl**

**Jedlí č.p. 61**

**789 92 Jedlí**

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

HÝBL , P. Drsnost povrchu při frézování nakloněným nástrojem. Ostrava: KATEDRA OBRÁBĚNÍ A MONTÁŽE, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010, 66 s. Diplomová práce , vedoucí Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Diplomová práce řeší problematiku obrábění povrchů nakloněným nástrojem. Seznamuje se současným stavem frézování tvarových ploch, používanými nástroji a stroji. Dále práce pojednává o morfologii obrobenej plochy z hlediska její fyzické struktury a geometrických parametrů, spjaté s tribologií. Představí možnosti obrábět plochy novými technologiemi, s ohledem na jejich technicko-ekonomické možnosti. Zabírá se přínosem aplikace nové technologie a její případné omezení při zavádění procesu do praxe.

## **ANOTATION OF THESIS**

HÝBL, P. Surface Roughness during Milling by Means of Tilt of Milling tool. Ostrava: Department of Tooling and Construction, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2010, 66 p. Thesis, head: Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Thesis deal with problems about surface cutting operation with tilt milling tool, next acquaint with present size of milling surface, milling cutter and milling machine which in use. Diploma paper treat of morphology milling surfaces in light of their physical structure and geometric dimension, their tribology. It take up with new potential milling surface and take technical/economics preferences into consideration. Enquiry into assets from new scopes milling and their possible limitation which are relevant with introduce into profession.

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Požadavky a cíle práce</b> .....	<b>11</b>
<b>3 Přehled současného stavu frézování tvarových ploch</b> .....	<b>12</b>
3.1 Poloha kopírovacího nástroje vůči obrobku.....	12
3.2 Nástroje pro obrábění tvarových ploch .....	15
<b>4 Hodnocení obrobené plochy</b> .....	<b>17</b>
4.1 Teoretická drsnost .....	17
4.2 Měření parametrů drsnosti .....	19
4.3 3D hodnocení textury .....	21
4.4 Posouzení integrity povrchu.....	23
<b>5 Moderní metody frézování</b> .....	<b>26</b>
5.1 Obrábění kalených materiálů slinutým karbidem .....	26
5.2 Technologie vysokorychlostního obrábění – HSC .....	26
5.3 Nevýhody tvarového frézování .....	27
<b>6 Realizace experimentu</b> .....	<b>32</b>
6.1 Použitý stroj .....	32
6.2 Použitý nástroj.....	35
6.3 Použitý materiál .....	37
6.4 Experimentální obrobení zkušebních ploch .....	39
<b>7 Vyhodnocení experimentu</b> .....	<b>41</b>
7.1 Hodnocení 3D-textury.....	41
7.2 Měření drsnosti.....	45
7.3 Stanovení statistické rovnice drsnosti povrchu .....	48
7.4 Objemový / časový výkon frézování.....	55
<b>8 Diskuze výsledků</b> .....	<b>57</b>
<b>9 Závěr</b> .....	<b>61</b>
<b>10 Související dokumenty</b> .....	<b>62</b>
<b>11 Přílohy</b> .....	<b>65</b>

## Seznam použitých zkratk

3D	-Třírozměrná soustava .....	[ - ]
ANSI	-Americká státní norma.....	[ - ]
CAD	-Počítačem podporované modelování.....	[ - ]
CAM	-Počítačem podporované obrábění.....	[ - ]
CD	-Kompaktní disk.....	[ - ]
CLA	-Chromatické konfokální laserové měření.....	[ - ]
ČSN	-Česká státní norma.....	[ - ]
DIN	-Německá státní norma .....	[ mm ]
EDM	-Elektro-erozivní obrábění .....	[ - ]
EN	-Evropská norma .....	[ - ]
HB	-Tvrдость podle Brinella .....	[ - ]
HRC	-Tvrдость podle Rockwella.....	[ - ]
HSC	-Vysoko-rychlostní řezání.....	[ - ]
HSM	-Vysoko-rychlostní obrábění .....	[ - ]
ISO	-Mezinárodní norma.....	[ - ]
LCD	-Displej z tekutých krystalů .....	[ - ]
NC	-Číslicově řízený .....	[ - ]
STN	-Slovenská státní norma .....	[ - ]
$a_e$	-Šířka řezu (krok frézy).....	[mm]
$a_p$	-Hloubka řezu.....	[mm]
B	-Řízená osa stroje .....	[ - ]
B	-Magnetická indukce.....	[ T ]
C	-Řízená osa stroje .....	[ - ]
$C_{Rz}$	-Konstanta charakteristické rovnice .....	[ - ]
$C_\theta$	-Konstanta charakteristické rovnice.....	[ - ]
d	-Průměr nástroje .....	[mm]
$d_{ef}$	-Efektivní průměr frézy.....	[mm]
$f_{min}$	-Nástrojový posuv .....	[m·min <sup>-1</sup> ]
$f_z$	-Posuv na zub .....	[mm]

$h$	-Hloubka pod povrchem .....[ mm ]
$H$	-Intenzita magnetického pole .....[A·m <sup>-1</sup> ]
$h_s$	-Vzdálenost měření od zbrousené hrany .....[ mm ]
$n$	-Počet naměřených hodnot .....[ - ]
$n$	-Počet otáček za minutu .....[min <sup>-1</sup> ]
$Q_{Rz}$	-Konstanta charakteristické rovnice .....[ - ]
$R$	-Poloměr frézy .....[mm]
$R_a$	-Střední aritmetická odchylka profilu drsnosti .....[μm]
$R_{sk}$	-Koeficient asymetrie profilu drsnosti .....[μm]
$R_z$	-Největší výška profilu drsnosti .....[μm]
$R_{zn}$	-Naměřená drsnost povrchu $R_z$ .....[ μm ]
$R_{zv}$	-Vypočítaná drsnost povrchu $R_z$ .....[ μm ]
$S$	-Obráběná plocha .....[ mm <sup>2</sup> ]
$s(x)$	-Směrodatná odchylka výběrová.....[ - ]
$t_1$	-Čas nutný k obrobení jednotkové plochy .....[ min ]
$v_c$	-Řezná rychlost .....[m·min <sup>-1</sup> ]
$v_{cef}$	-Efektivní řezná rychlost.....[m·min <sup>-1</sup> ]
$v_f$	-Posuvová rychlost.....[m·min <sup>-1</sup> ]
$V_{min}$	-Objem materiálu odebraný za jednotku času.....[mm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> ]
$W_{Rz}$	-Konstanta charakteristické rovnice .....[ - ]
$X$	-Řízená osa stroje .....[ - ]
$x_i$	-Naměřená hodnota .....[ - ]
$X_\theta$	-Konstanta charakteristické rovnice .....[ - ]
$X_{Rz}$	-Konstanta charakteristické rovnice .....[ - ]
$\bar{x}$	-Aritmetický průměr naměřených hodnot.....[ - ]
$Y$	-Řízená osa stroje .....[ - ]
$Y_\theta$	-Konstanta charakteristické rovnice .....[ - ]
$Y_{Rz}$	-Konstanta charakteristické rovnice .....[ - ]
$Z$	-Řízená osa stroje .....[ - ]
$z$	-Počet zubů frézy .....[ - ]
$Z_\theta$	-Konstanta charakteristické rovnice .....[ - ]
$Z_{Rz}$	-Konstanta charakteristické rovnice .....[ - ]



$\alpha$	-Úhel řezu.....[ ° ]
$\beta_f$	-Náklon nástroje ve směru posuvu.....[ ° ]
$\beta_n$	-Náklon nástroje kolmo na směr posuvu .....[ ° ]
$\lambda$	-Stoupání šroubovice nástroje.....[ ° ]
$\lambda_c$	-Selektivní filtr základního profilu.....[ - ]
$\lambda_f$	-Dlouhovlnný filtr základního profilu.....[ - ]
$\lambda_s$	-Krátkovlnný filtr základního profilu.....[ - ]
$\sigma(X)$	-Směrodatná odchylka základního souboru .....[ - ]
$\sigma_{T,A}$	-Odchylka teoretické / analytické drsnosti od skutečné, naměřené ..[ % ]

# 1 Úvod

Těžko by jsme v dnešní době hledali výrobek či jeho součást, případně přípravek pro jeho vyhotovení, který by nepřišel při výrobě do styku s nástrojem pro třískové obrábění. Může se jednat o leštění, broušení, řezání, vrtání, závitování, nebo nejčastěji soustružení či frézování, které nás v tomto směru bude zajímat nejvíce. Existují dnes sice metody a technologické postupy, které potřebu třískové obrábění eliminují, dokonce vůbec nepoužívají. Každopádně si ale třískové obrábění stále drží svůj post a svoje místo by v budoucnosti mohlo mít po dlouhou dobu jisté.

V současné době jsou definovány standardy a normy, které předepisují jak, co a jakým způsobem obrábět. Ovšem technologie se vyvíjí, stejně jako nové řezné materiály, obdobně nové povlaky pro obráběcí nástroje. Díky tomu se otvírají nové možnosti výroby- její „zekologičtění“(greening), zefektivnění a zrychlení výrobního procesu. Díky moderním strojům je možné vyrábět kvalitnější součásti s delší životností. Toho lze ale dosáhnout pouze v případě, že výhody a přednosti s novými poznatky spjaté, budeme moci (a hlavně umět) patřičně využít.

## 2 Požadavky a cíle práce

Tezí diplomové práce je seznámit s možnostmi obrábění tvarových ploch (konkrétně z materiálu pro výrobu forem). Jedná se o metody obrábění jak konvenční, tak moderní vysokorychlostní obrábění nakloněným kopírovacím nástrojem. Požadavkem je stanovit nejvýhodnější technologické podmínky z hlediska jakosti a nákladů na obrobený povrch.

Z provedených experimentů budou zpracována data o drsnosti povrchu a porovnány mezi sebou, vyhodnocena metoda výhodnější pro docílení požadované jakosti povrchu. Záměrem je také vyhodnocení procesu z hlediska času frézování jednotně stanovené plochy (což je důležitý faktor ovlivňující cenu výrobního procesu).

Cílem teoretické části je nastínit možný postup výpočtu drsnosti povrchu pomocí strukturních rovnic odvozených ze souboru naměřených hodnot. Takto postavený matematický model by mohl za stanovených podmínek produkovat výsledky mnohem přesnější, než současné teoretické vzorce.

### 3 Přehled současného stavu frézování tvarových ploch

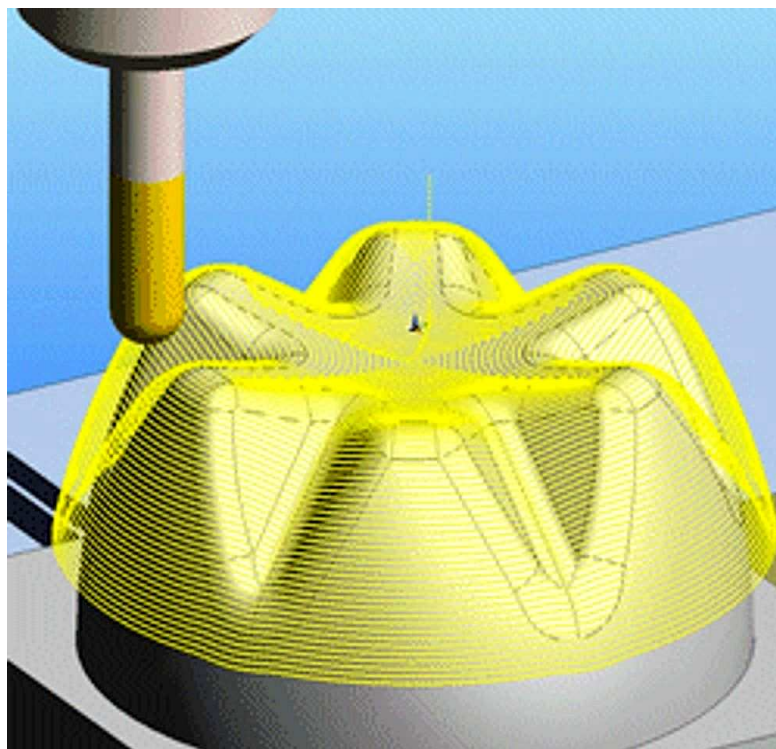
Podle možností použitého obráběcího stroje existuje několik metod frézování tvarových ploch. Nejstarší metodou je ruční frézování tvarových ploch, kdy obsluha ručně kombinuje příčný a podélný posuv, dále frézování přes šablony – pro opakovanou reprodukci výrobku, nebo frézování kopírovací – dle tvarové předlohy.

Obráběcí centra využívají pro řízení pohybu v jednotlivých osách počítače. Ty dokáží řídit plynulý pohyb s interpolací buď ve 2 osách, s parametrickým nastavením nástroje v ose Z, nebo moderní centra řídící trajektorii nástroje plynule ve všech 3, případně v 4, nebo 5 osách (např. osa X, Y, Z, B, C).

#### 3.1 Poloha kopírovacího nástroje vůči obrobku

Fréza při frézování obráběné plochy může vykonávat řadu pohybů. V nejjednodušším případě se jedná pouze o posuv podélný, příčný nebo kruhový. U simultánního obrábění je posuv řízen plynulým pohybem minimálně ve 3 osách současně. Při frézování k hloubce řezu a posuvu přibývá ještě jeden parametr odřezávané vrstvy - šířka obrábění „b“, která je u válcové frézy dána jejím průměrem, zatímco u kulové kopírovací frézy je šířka obrábění dána efektivním průměrem frézy  $d_{ef}$  a axiálním přísuvem nástroje (hloubkou řezu)  $a_p$ .

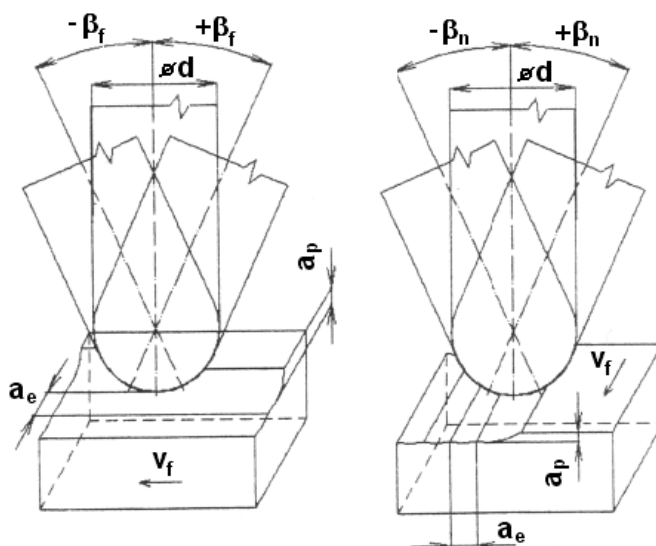
V dnešní době hojně používanou dokončovací metodou, je metoda frézování 3D tvarových ploch kulovou kopírovací frézou. Ve většině těchto operací se obrábí nástrojem bez náklonu, tudíž ve většině případů i jeho středem, kde se řezná rychlost blíží nule. Výjimkou může být obrábění velice strmých tvarových ploch, kdy nástroj má sice nulový sklon vzhledem k základně stroje, ale vzhledem k strmému obráběnému povrchu lze sklon nástroje definovat (obr. 1).



*Obr. 1: Příklad trajektorie nástroje tvarové plochy [1]*

Požadujeme-li souvislou povrchovou vrstvu s jednotnými parametry a mechanickými vlastnostmi, je nutné dodržet stále stejné postavení nástroje vůči obrobku, použití stejného nástroje a stejných technologických podmínek. Takovýmto způsobem obrobek lze docílit pouze u moderního 5-ti osého simultánně řízeného obráběcího centra, s genezí trajektorie kopírovací frézy výhradně pomocí softwarového nástroje (SolidWorks, SoliCAD, EdgeCAM apod.). Takto „celiství“ povrch bude více odolnější proti zatížení a bude vykazovat méně únavových trhlin proti povrchu obrobku konvenčním obráběním.

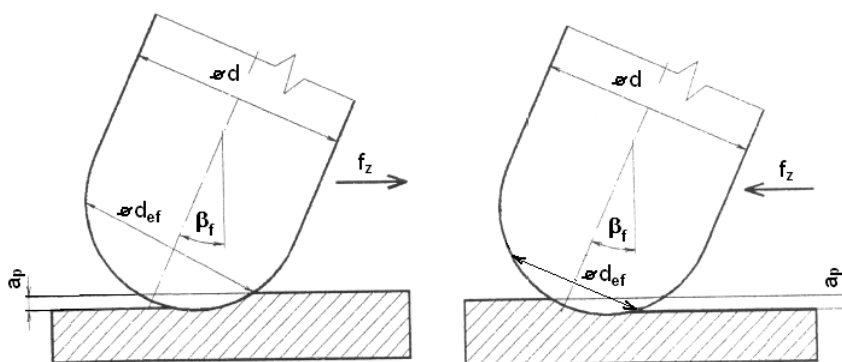
Obrábění nakloněným nástrojem má oproti standardnímu obrábění, kdy nástroj svírá s obrobkem pravý úhel, řadu výhod. Na styčné ploše nástroj-obrobek nakloněného nástroje se nevyskytuje místo s nulovou řeznou rychlostí, nedochází tedy k nežádoucímu zatlačování a přechování třísky, spojené se zvyšováním teploty v místě řezu, zvyšování chvění, případně zvýšená tvorba nárůstku. Tyto jevy vedou ke zhoršené kvalitě povrchu obráběného materiálu a snížení trvanlivosti nástroje, případně vyštípnutí jeho ostří. Úhel naklonění nástroje vůči obrobku nastavujeme buď naklápěním nástroje (převážně u rozměrných obrobků), nebo samotného obrobku (u rozměrově malých a lehkých součástí). Záleží také na dispozicích použitého obráběcího stroje.



Obr. 2 : Frézování nástrojem naklopeným ve směru posuvu (vlevo), naklopeným kolmo na směr posuvu (vpravo). [2]

Náklon nástroje je úhel mezi osou rotujícího nástroje a normálou k obráběnému povrchu. Nástroj lze naklopit jak ve směru posuvu (označujeme jako nástroj tlačný, či tažený), tak i kolmo ke směru posuvu (obr. 2). Dle pohybu nástroje vůči obrobku rozlišujeme frézování sousledné a nesousledné. Výzkumy poslední doby dokládají, že vzhledem k energetické náročnosti a struktuře povrchu je výhodnější frézování sousledné. Toho lze využít u čelního frézování válcovou frézou, ale také u kopírovacího frézování kulovou nebo kuželovou frézou.

Řezná rychlost je při soustružení obvodová rychlost obrobku a při frézování je to obvodová rychlost frézy. U kulové kopírovací frézy se uvádí řezná rychlost, která přísluší efektivnímu průměru frézy  $d_{ef}$ . Efektivním průměrem frézy je myšlen největší průměr na kulové ploše (obr. 3), který je ve styku s obrobkem.



Obr. 3: Frézování naklopeným nástrojem – tažený nástroj (vlevo), tlačný nástroj (vpravo) [2]

Pro tažený nástroj lze spočítat efektivní průměr kulové frézy pomocí následujícího vztahu [2]:

$$d_{ef} = d \cdot \sin \left[ \arccos \left( \frac{d - 2 \cdot a_p}{d} \right) + \beta_f \right] \quad (3.1)$$

kde:  $a_p$  – axiální přísuv nástroje(hloubka řezu) [mm]

$\beta_f$  – úhel naklonění nástroje ve směru posuvu [°]

$d$  – průměr frézy [mm]

$d_{ef}$  – skutečný (efektivní) průměr frézy [mm]

Jedná-li se o frézování s nástrojem tlačným, je nutné operátor „+“ před členem  $\beta_f$  ve vztahu (3.1) zaměnit za „-“. Z geometrického hlediska (obr. 3) platí stejné vztahy i pro výpočet efektivního průměru nakloпенé frézy v rovině kolmé k posuvu. Vzorec pro výpočet  $d_{ef}$  nástroje s úhlem  $+\beta_n$  je ekvivalentní se vzorcem pro nástroj tažený, stejně tak náklonu  $-\beta_n$  odpovídá vzorec pro nástroj tlačný. V případě frézování bez naklonění nástroje, je efektivní průměr frézy [2]:

$$d_{ef} = 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (d - a_p)} \quad (3.2)$$

kde:  $a_p$  – axiální přísuv nástroje(hloubka řezu) [mm]

$d$  – průměr frézy [mm]

$d_{ef}$  – skutečný (efektivní) průměr frézy [mm]

### 3.2 Nástroje pro obrábění tvarových ploch

Každý materiál si žádá jiný přístup k jeho obrábění - jiný počet břitů, jinou geometrii frézy, jiný úhel zkosení břitu. Pro dokončovací obrábění tvarových ploch se zásadně používají kopírovací frézy kulové a kuželové, v různých provedeních: krátké, dlouhé, 2-4 zubé. Mohou být buď celokarbidové (obr. 4, 5), nebo v provedení s vyměnitelnými břitovými destičkami (obr. 6, 7). Existuje nespočet druhů a variant

těchto fréz, stejně tak jako druhů různých povlaků povrchu, zvyšující životnost nástroje (destičky).



*Obr. 4: Fréza kopírovací - krátká, 2-zubá [3]*



*Obr. 5: Fréza kopírovací - kuželová, 4-zubá [3]*



*Obr. 6: Kulová kopírovací fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami [4]*



*Obr. 7: Fréza s plným rádiusem s jednou vyměnitelnou břitovou destičkou [5]*

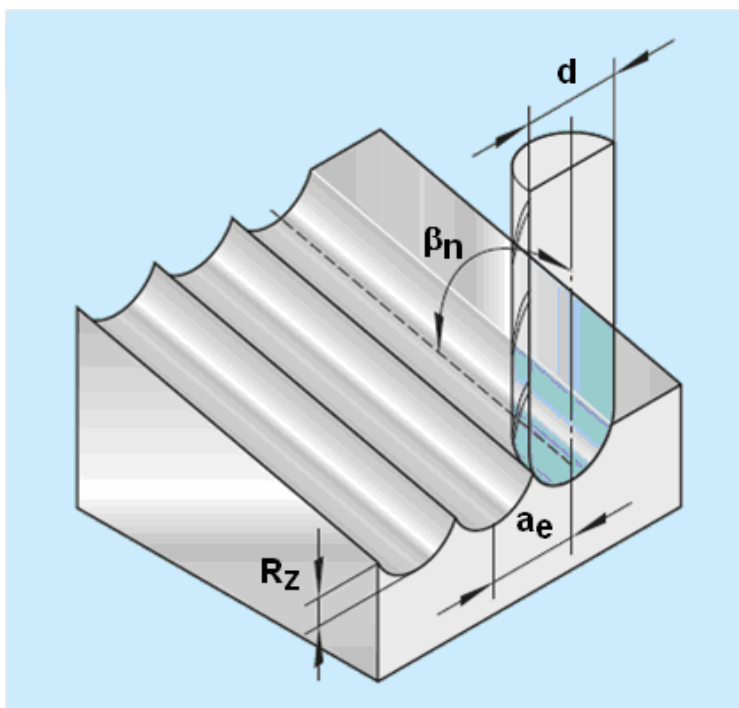


## 4 Hodnocení obrobené plochy

Každý funkční povrch je nutné posoudit z hlediska vhodnosti použitých technologických podmínek. Sledováním vlastností povrchu lze dobře předpovědět vlastnosti součásti z hlediska opotřebení a její životnosti. V tomto procesu se velice dobře uplatňuje sledování drsnosti povrchu a vlastností povrchové vrstvy obrobku.

### 4.1 Teoretická drsnost

Pod pojmem teoretická drsnost si lze představit číselnou hodnotu, jejíž velikost byla stanovena na základě empirických vztahů. Tyto vztahy vychází z dlouhodobých zkušeností a především, ze znalosti geometrických tvarů nástroje a obrobku, případně technologických podmínek jako posuv na zub  $f_z$  a šířka řezu  $a_e$  (viz. obr. 8).



Obr. 8: Schématický model pro výpočet teoretické drsnosti  $R_z$  [6]

V literatuře lze nalézt několik typů vztahů, přičemž vztahy pro výpočet teoretické drsnosti  $R_Z$  při kopírovacím obrábění kulovou frézou vychází právě z geometrických poznatků - dle [6] a [7] uvedené ve tvaru:

Pro podélnou drsnost:

$$R_Z = \frac{f_z^2}{8 \cdot R} \quad (4.1)$$

kde:  $R_Z$  – největší výška nerovnosti profilu [mm]  
 $R$  – poloměr frézy [mm]  
 $f_z$  – posuv na zub [mm]

Pro příčnou drsnost:

$$R_Z = \frac{a_e^2}{8 \cdot R} \quad (4.2)$$

kde:  $R_Z$  – největší výška nerovnosti profilu [mm]  
 $R$  – poloměr frézy [mm]  
 $a_e$  – krok frézy [mm]

Možný je i případný přesnější vztah pro výpočet teoretické drsnosti ve směru kolmém k posuvu:

$$R_Z = \frac{d}{2} - \sqrt{\frac{d^2 - a_e^2}{4}} \quad (4.3)$$

kde:  $R_Z$  – největší výška nerovnosti profilu [mm]  
 $d$  – průměr frézy [mm]  
 $a_e$  – krok frézy [mm]

Norma EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288 počítá výšku profilu  $R_Z$  jako součet výšky nejvyššího vrcholu profilu a hloubky nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [7], tedy:

$$R_Z = \frac{d}{2} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{a_e^2}{4 \cdot R^2}} \right) \quad (4.4)$$

kde:  $R_z$  – největší výška nerovnosti profilu [mm]  
 $d$  – průměr frézy [mm]  
 $R$  – poloměr frézy [mm]  
 $a_e$  – krok frézy [mm]

## 4.2 Měření parametrů drsnosti

V našich experimentech byla tato metoda použita z důvodu snadné dostupnosti a poměrně velké objektivnosti naměřených výsledků. Hodnocení charakteru povrchu vychází z profilové metody, tj. hodnotí povrch z profilu – čáry, která vznikne řezem skutečného obrobeného povrchu definovanou plochou [8]. Základní profilové parametry jsou definované normou ISO 4287 z roku 1997.

Rozdělení profilů povrchu:

- nasnímaný profil
- úplný profil
- primární profil
- profil drsnosti
- profil vlnitosti

Norma definuje nasnímaný profil jako geometrické místo styku středu ideálního, kuželového hrotu s měřeným povrchem. Úplný profil je soubor všech digitálních naměřených hodnot v odpovídajících vertikálních a horizontálních souřadnicích. Aplikací krátkovlnného filtru (s vlnovou délkou  $\lambda_s$ ) na naměřená data úplného profilu získáme primární profil, který reprezentuje základ pro výpočet parametrů profilu dle EN ISO 4287: 1997.

Profil drsnosti odvozujeme z primárního profilu potlačením složek s dlouhou vlnovou délkou – filtrem profilu  $\lambda_c$ . Přenosové pásmo profilu drsnosti je potom definované profilovým filtrem  $\lambda_s$  a  $\lambda_c$ . Takový profil je pak základem pro určení parametru drsnosti. Oproti původní normě je definovaná mezní délka  $\lambda_s$ , která omezuje profil drsnosti ze strany kratších vlnových délek.

Profil vlnitosti získáme z primárního profilu použitím profilového filtru  $\lambda_c$  a  $\lambda_f$ . Filtr  $\lambda_f$  potlačí dlouhovlnné složky, filtr  $\lambda_c$  potlačí složky krátkovlnné. Přenosová

charakteristika filtru v mezních vlnových délkách přenáší dle stávající normy pouze 50% amplitudu.

Filtrem profilu rozumíme filtr, který rozděluje profily povrchu s dlouhými vlnovými délkami, nebo profily s krátkými vlnovými délkami (dle STN EN ISO 11562: 2000), přičemž podle ISO 11 562 existují 3 druhy filtrů se stejnou přenosovou charakteristikou, lišících se mezními vlnovými délkami (jedná se o filtr 2RC, PC75, a GAUSS).

V našem případě bylo pro posouzení jakosti obrobené plochy využito sledování parametru  $R_z$ , tedy číselné vyjádření největší výšky nerovnosti na měřeném profilu v rozsahu základní délky. Je to spolehlivý parametr vyjadřující extrém mezi maximální výškou výstupku na měřeném profilu, a maximální hloubkou prohlubně.

K souboru  $n$ -naměřených hodnot byly taktéž stanoveny směrodatné výběrové odchylky dle vztahu [8]:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4.5)$$

kde:  $s(x)$  – směrodatná výběrová odchylka [-]  
 $x_i$  – jednotlivé naměřené hodnoty veličiny  $x$  [-]  
 $\bar{x}$  – aritmetický průměr naměřených hodnot [-]  
 $n$  – počet naměřených hodnot [-]

Dále na základě směrodatné výběrové odchylky  $s(x)$  byla spočtena směrodatná odchylka základního souboru naměřených hodnot  $\sigma(X)$  [8]:

$$\sigma(X) = s(x) \cdot \sqrt{\frac{n}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.6)$$

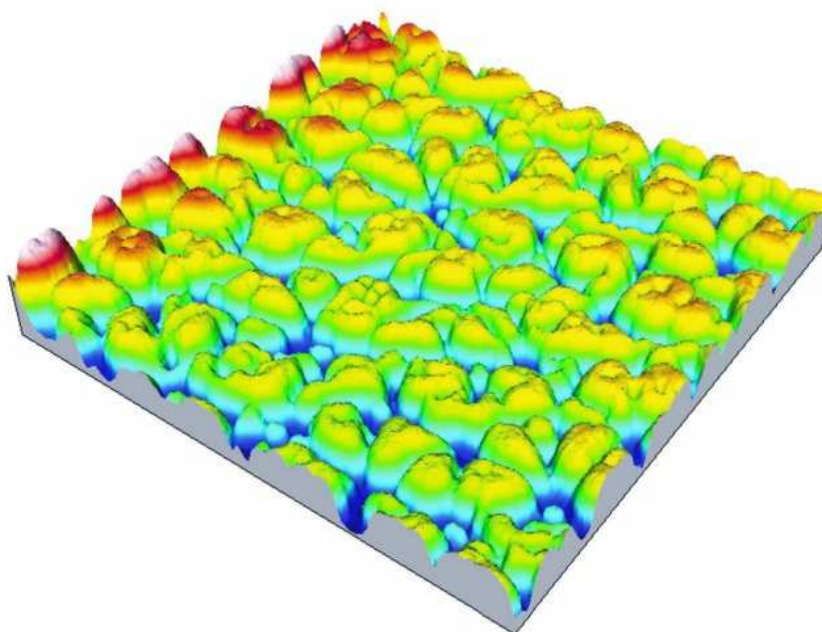
kde:  $\sigma(X)$  – směrodatná odchylka základního souboru [-]  
 $s(x)$  – směrodatná výběrová odchylka [-]  
 $x_i$  – jednotlivé naměřené hodnoty veličiny  $x$  [-]  
 $\bar{x}$  – aritmetický průměr naměřených hodnot [-]  
 $n$  – počet naměřených hodnot [-]

Tímto postupem byl sestaven soubor parametrů drsnosti, pro jednotlivé experimenty – v příčném i podélném směru (viz kapitola 7.2 – měření drsnosti povrchů). Odchytky a nejistoty naměřených hodnot drsností jsou uvedeny pouze v příloze na CD-disku, v souboru naměřených dat (není podstatou této práce se jimi dále zabývat).

### 4.3 3D hodnocení textury

V tomto experimentu bylo použito pouze optické pozorování. Prostorové měření (popsané v [9]) nicméně hodnotí profil povrchu velmi věrohodně a přináší velmi cenné a prakticky využitelné informace o vztazích mezi geometrickou charakteristikou povrchu a jeho funkčními vlastnostmi. Rychlý rozvoj měřicí techniky a programového zabezpečení procesu kontroly umožňuje v současné době uplatnit přednosti 3D hodnocení textury povrchu v praxi.

Pro zpracování jsou nutné speciální programy, určené k vyhodnocování parametrů a vlastností povrchů, které jsou rozhodující pro jejich konkrétní funkci – např. opotřebení, poškození, erozi povrchu apod. 3D analýza textury povrchu ukazuje nejen na současnou úroveň – obsah a rozsah – hodnocení, ale zároveň dokumentuje i jejich nezastupitelný význam pro posuzování kvality funkčních povrchů (obr. 9, 10).

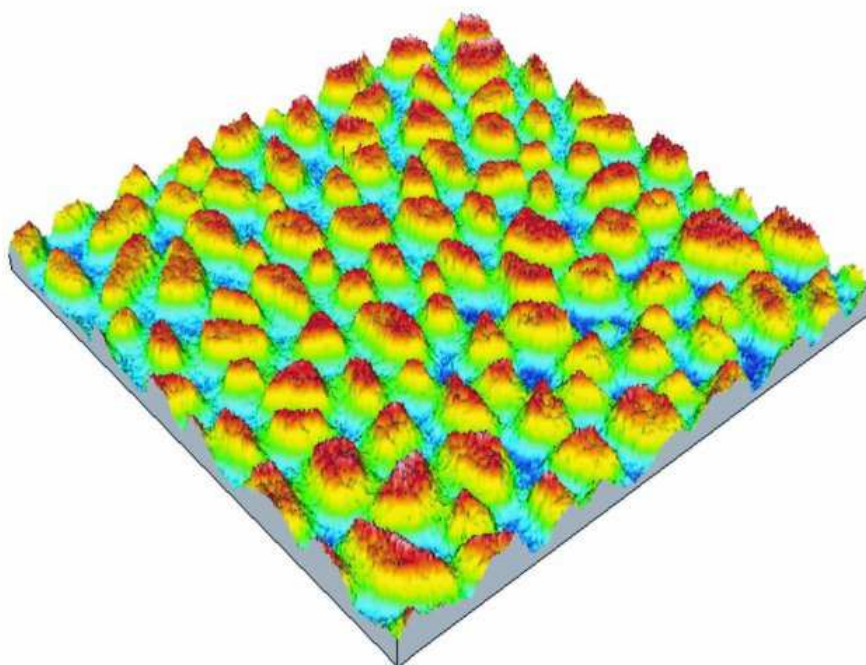


*Obr. 9: Trojrozměrná analýza textury povrchu [9]*

Vhodným přístrojem pro uvedené experimenty by mohl být např. systém Talysurf CLI od firmy Taylor Hobson. S využitím analýz Talymap zajišťuje vysokou úroveň přesnosti a opakovatelnosti výsledků měření. Rozsáhlé využití statistických metod zjednodušuje měření a diagnostiku měřených povrchů. Toto měření je založeno na bezkontaktním principu CLA (chromatická, konfokální) s využitím laserové sondy. Vysoká funkční rychlost přístroje (který může pracovat i plně automaticky) a rychlé zpracování dat výrazně snižují čas skenování povrchu.

Hodnocení povrchu komplexního substrátu programem Texture Surfaces je určeno k 3D hodnocení textury povrchu základního, nebo podkladového materiálu. Základní funkcí je výpočet ploch a objemů výstupků i prohlubní povrchu vzhledem k výškové mezi zadané uživatelem. Výstupní informace zahrnují plochu, objem, maximální a průměrnou výšku i hloubku výstupků a prohlubní.

Použité parametry hodnocení představují cenné informace o schopnosti povrchu udržet mazací médium, v provozní praxi poslouží pro stanovení úbytku materiálu či umožní predikci životnosti funkčního povrchu z hlediska opotřebení. Jedním z klasických požadavků na charakteristiku procesu eroze je také porovnání povrchu vzorku před opotřebením a po něm.



*Obr. 10: Textura povrchu komplexního substrátu s barevným rozlišením výšek zobrazená programem Talymap – Textured Surfaces [9]*

## 4.4 Posouzení integrity povrchu

Kvalitu a jakost obrobeného povrchu můžeme posuzovat ze tří pohledů. Prvním jsou geometrické vlastnosti povrchu (kapitola 4.2), druhým jsou fyzikálně-mechanické vlastnosti povrchové vrstvy a naposled fyzikálně-chemický stav povrchu.

Hodnocení kvality povrchu z hlediska fyzikálně-mechanického a fyzikálně-chemického stavu povrchu zahrnuje:

- zpevnění obrobeného povrchu (mikrotvrdost)
- zbytkové napětí v povrchové vrstvě
- vznik trhlin v obrobeném povrchu
- změny struktury materiálu
- změny chemického složení
- plastická deformace
- opal povrchu apod.

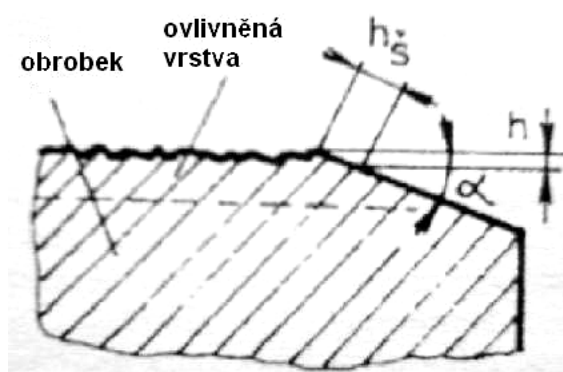
Pro posouzení těchto vlastností existuje velké množství metod (detailně popsané v [8]), přičemž nejznámější a nejpoužívanější jsou založené na použití:

- rentgenového záření (rentgenová difrakce jedno-dvou-tříosá, rentgenová topografie, rentgenová reflexe)
- ultrazvuku (akustická emise, akustická mikroskopie, foto-akustická mikroskopie)
- magnetického pole (měření rozptylu magnetického pole, analýza magnetických částic, mikromagnetické techniky)
- optických metod (optická difrakce, rozptyl polarizovaného světla, polarizovaná mikroskopie, skvrnová interferometrie, kapilární zkoušky)
- chemické metody (leptání povrchu)

Z těchto laboratorních metod lze vybrat pro náš účel dvě nejvhodnějších (s ohledem na náklady a dostupnost laboratorních zařízení), se zaměřením na fyzikálně-mechanické vlastnosti obrobeného povrchu:

### Metoda kolmých řezů

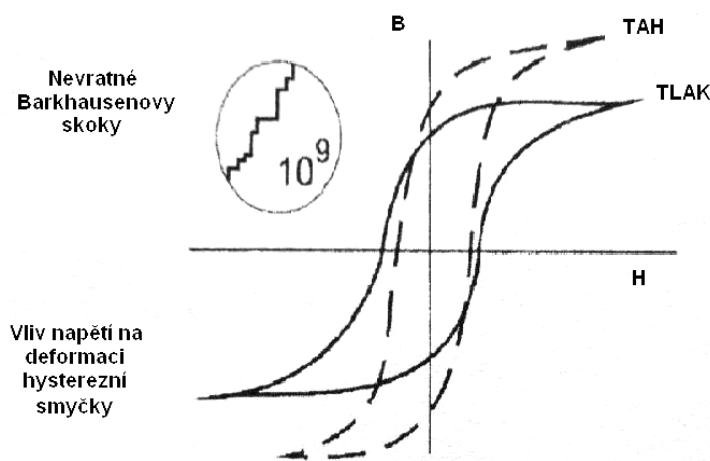
Zkouška založená na mechanickém zkoumání povrchu. Vzhledem k povrchu se vybrousí a vyleští šikmý řez pod úhlem  $1\pm 2^\circ$  (obr. 11). Do této plochy se následně (s ohledem na přepočítanou hloubku vpichu) provede několik vtisků mikrotvrdosti. Tímto způsobem lze souborem vtisků prověřit ovlivnění materiálu (jeho zpevnění či odpevnění) v určeném rozsahu od povrchu směrem do středu obrobeného materiálu. Metoda je časově velice náročná a pracná, nicméně má velkou objektivitu.



Obr. 11: Měření mikrotvrdosti na šikmém řezu [8]

### Měření vnitřních napětí Barkhausenovým šumem

Mikromagnetická technika, využívá elektromagnetické indukce ve sledovaném materiálu vyvolané přiloženou sondou. Je založeno na principu sledování deformace hysterézní smyčky, způsobené vlivem vnitřních mechanických napětí v podpovrchové vrstvě (obr. 12).



Obr. 12: Vliv vnitřních napětí na deformaci hysterézní smyčky [8]

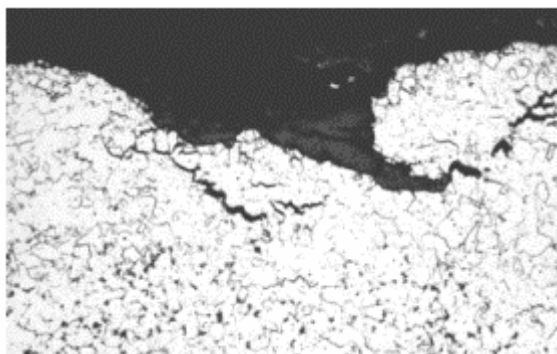


Jedná se o jednoduché, rychlé a objektivní měření bez narušení zkoumaného materiálu. Nevýhodou je poněkud vyšší pořizovací cena zařízení využívající tuto metodu. Přístroj pracující na principu měření Barkhausenova šumu se jednoduše přiloží k měřenému povrchu a přímo na displeji se odečte číselná hodnota, která přímo odpovídá vlastnostem (vnitřnímu napětí) povrchové vrstvy ve stanovené hloubce. Tato metoda je vhodná pro srovnání několika obrobených ploch mezi sebou, z hlediska vnitřního pnutí v povrchové vrstvě.

### **Praktické zkoušky**

Praktickou zkouškou kvality obrobku, resp. kvality obrobené plochy a jejích funkčních vlastností, je jejich prověření přímo v provozu. Lze hodnotit opotřebení obrobků, opotřebení povrchu obrobků, vady na povrchu, případně lomy apod. Tímto způsobem je možné určit životnost výrobků, v cyklickém i statickém zatížení. Kvalita obrobeného povrchu se vždy projeví na životnosti součásti a má nejsilnější vypovídací hodnotu o efektivitě obrábění. Nicméně jde ve většině případů o časově zcela neadekvátní metodu, kterou lze použít pouze ve výhradních případech. Efektivnější, ekonomičtější a ekologičtější je pro nás poznatek: jakým způsobem a za jakých podmínek součást vyrobit, aby bylo dosaženo co nejlepší kvality. Toto platí dvojnásob u součástí určených pro velkosériovou a hromadnou výrobu, s předpokladem dlouhé životnosti (nebereme v potaz prodejní a výrobní strategie součástí, s životností „záruční lhůty“).

Únavové trhliny mohou být důsledkem velkého tepelného namáhání obrobku (oduhličení kalených materiálů obr. 13), nebo vlivem působení tahových napětí v podpovrchové vrstvě.



*Obr. 13: Únavová trhлина na povrchu formy [10]*

## **5 Moderní metody frézování**

Vedle klasického konvenčního frézování způsoby, výhradně používanými v nedávné minulosti, ale se kterými se v dnešní době lze setkat ještě poměrně často, existuje dnes nespočet technologií frézování obrobků s řadou výhod. Umožňují to nové koncepce obráběcích strojů a nástrojů, vyvinuté v poslední době.

### **5.1 Obrábění kalených materiálů slinutým karbidem**

Kalené materiály patří do skupiny materiálů s vysokou tvrdostí. Pod pojmem vysoká tvrdost se z hlediska obrábění rozumí obecně (u ocelí a litin), interval tvrdostí v rozsahu od 43 do 70 HRC. Ještě donedávna bylo jedinou možností obrábění při extrémně nízkých řezných rychlostech nebo broušení.

Vývoj moderních řezných materiálů (slinutých karbidů, řezné keramiky, kubického nitridu boru) s vyšší řezivostí a nebo tenkých otěruvzdorných vrstev aplikovaných na nástroj [11], přinesl do obrábění kalených materiálů revoluci [12]. Tímto byl položen základní kámen pro nový přístup v obrábění, dnes známý jako vysokorychlostní obrábění – HSC.

K druhům materiálů, které se dají výhodně obrábět slinutým karbidem, patří i těžkoobrobitelné materiály, jako kalené oceli, tvrzená litina a povrchově kalené obrobky. S ohledem na průměr nástroje lze sousledně frézovat rovinné i tvarové plochy, otevřená i uzavřená vybrání, stranová osazení, a to bez použití chladicí kapaliny s jakostí povrchu až  $R_a = 0,2 \mu\text{m}$ . Přerušovaný řez není pro tyto nástroje na závadu.

### **5.2 Technologie vysokorychlostního obrábění – HSC**

HSC je tvrdé, suché obrábění tzv. vysokou řeznou rychlostí. Pro každý obráběný materiál je hranice vysoké řezné rychlosti odlišná [13], přičemž se pohybuje přibližně v rozsahu  $200 \div 400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  pro kalené oceli a litiny [14]. Tuto hranici ovlivňuje druh řezného materiálu, tenká povrchová vrstva, geometrie břitu a konstrukční provedení

nástroje – nástroj monolitní nebo s vyměnitelnými břitovými destičkami. V podmínkách HSC se teplota třísky přibližuje teplotě tavení obráběného materiálu a při určité řezné rychlosti dojde k náhlé změně řady strukturálních i mechanických vlastností třísky. Tříska změkne a sníží svou přítlačnou sílu na čelo břitu, třecí síla i celkový řezný odpor obráběného materiálu klesnou, zvětší se úhel smykové roviny, ztenčí se průřez třísky, zvýší se rychlost jejího odchodu z kontaktní zóny na čele, sníží se plochy kontaktních zón na čele a hřbetě, a tím se omezí sekundární i terciální nárůst teploty třísky třením v těchto zónách. Lze konstatovat, že při HSC převažují v obráběném materiálu a třísce děje odpevňovací nad zpevňovacími.

Při HSC dochází k výraznému podílu tepla odváděného třískou, proto nedochází k takovému výraznému tepelnému ovlivnění obrobku, a tudíž dochází ke snížení jeho tepelných deformací a zvýšení rozměrové a tvarové přesnosti obrobku (pokud zajistíme kvalitní odvod rozžhavených třísek od obrobku). Dochází též ke zlepšení jakosti a celkové integrity obrobku, což může znamenat minimalizaci nebo úplné odstranění dokončovacích operací či dosažení příznivých napětových stavů v povrchové vrstvě.

S pojmem HSC je úzce spjat pojem HSM, který souvisí jak s vysokou řeznou rychlostí, tak s vysokými posuvovými rychlostmi vysoce optimalizované a strategicky navržené dráhy nástroje – obrábění s vysokou produktivitou a rychlostí.

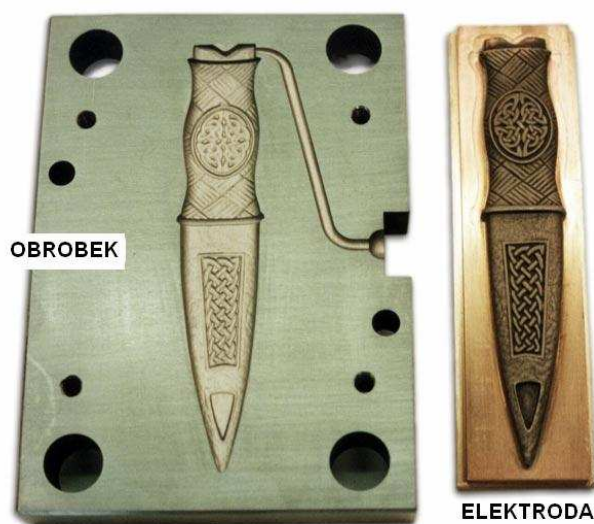
### **5.3 Nevýhody tvarového frézování**

Každá technologie, která vyniká nějakým způsobem nad ostatními, musí mít vedle svých výhod i své nevýhody. V případě obrábění povrchů, ať už výrobních forem, či hotových výrobků, může nastat případ, kdy se s frézovacím nástrojem nedostaneme do míst, které je nutné obrobit (buď z hlediska nepřístupnosti, případně potřeby vytvořit velice malé detaily). Tato nevýhoda je v případě obrábění povrchů naklopeným nástrojem ještě více komplikovanější. Problém může nastat z požadavku obrobit úzké, hluboké nebo tvarově složité dutiny. V takových případech geometrie nástroje (případně upínacího zařízení nástroje) nedovolí tvarový povrch vyrobit, a je nutné použít k výrobě jinou, nekonvenční technologii. Ta musí v první řadě splňovat požadavek, aby výsledný

obrobený povrch byl vytvořen nejen v požadované jakosti, ale i kvalitě, minimálně srovnatelné s parametry povrchu ofrézovaného nástrojem s náklonem, případně parametrů lepších.

### **EDM – Alternativní metoda obrábění**

Za nejpoužívanější alternativní a výhodnou technologii lze považovat technologii elektroerozivního hloubení (EDM). Buď celá forma, nebo jen její tvarově složitá část (u forem velkých rozměrů) se umístí do kapalně lázně obráběcího stroje, která je zároveň dielektrikem. Odebírání částic obráběného materiálu probíhá účinkem tepelného a tlakového působení elektrických výbojů, vznikajících mezi nástrojovou elektrodou a obráběným materiálem. Tímto způsobem dojde k inverznímu přenesení tvaru nástroje na obrobek (obr. 14), [15].



*Obr. 14: Příklad nástroje / obrobku technologie EDM [1]*

Výhodou této technologie je obrábění vodivých materiálů bez ohledu na jejich mechanické vlastnosti, výroba povrchů různých jakostí, výroba tvarově složitých součástí (dutin). Lze vyrábět i tvary jinými metodami obrábění nerealizovatelné. Při výrobě na obrobek nepůsobí žádné mechanické zatížení, vzniká menší odpad a na hranách obrobku nezůstávají otřepy. Celý proces výroby lze snadno automatizovat, přičemž nástrojové elektrody lze vyrobít jednoduchým způsobem – nejčastěji z grafitu (obr. 15). Ten se hodí pro obrábění tvrdých kalených materiálů stejně dobře, jako měď.

Nevýhodou grafitu je jeho křehkost a fakt, že jeho opotřebováváním dochází ke znečištění výrobního stroje.



*Obr. 15: Příklad grafitových nástrojů pro elektroerozivní hloubení [16]*

Nevýhodou je nepřímá úměra mezi jakostí obrobeného povrchu a produktivitou procesu a nutnost ponoření obrobku do procesní kapaliny. Špatně se obrábí měkké materiály a především, jakost povrchu je závislá na mnoha faktorech obrábění, které nelze předem spolehlivě určit.

Výrobci elektroerozivních obráběcích strojů existuje celá řada. Z neznámějších lze např. zmínit špičkové stroje Exeron německé provenience, švýcarskou firmu +GF+ AgieCharmilles, nebo tuzemského výrobce elektroerozivních hloubiček Penta Trading [17], které jsou svoji kvalitou a využitím srovnatelné se světovou špičkou, ale oproti konkurenci podstatně levnější.

Ze srovnávacích tabulek č. 1, 2 je patrné, že technologií elektroerozivního hloubení lze dosáhnout jakosti a kvality povrchu srovnatelné s frézováním. Oproti tomu je cena za odebraný materiál technologií EDM enormně vysoká, ovšem pokud požadované tvary nelze vytvořit jiným způsobem, je toto srovnání bezpředmětné.

Tabulka č. 1: Srovnání parametrů obrábění frézováním a EDM obráběním [15], [17]

Parametr	Jednotka	HSM frézování	EDM obrábění
Měrná spotřeba energie	kWh / cm <sup>3</sup>	0,001 ÷ 0,01	0,1 ÷ 1
Dosažitelná drsnost R <sub>a</sub> )*	μm	6,3 / 0,8 ÷ 1,6	6,3 / 0,5 ÷ 2
Přesnost rozměru)*	mm	± 0,05 ÷ 0,1 / ± 0,01 ÷ 0,05	± 0,02 ÷ 0,5 / ± 0,01 ÷ 0,02
Hloubka ovlivněné vrstvy)*	μm	200 ÷ 300 / 100 ÷ 200	200 ÷ 300 / 20 ÷ 50
Objemový úběr materiálu	cm <sup>3</sup> / min	> 1000	0,1 ÷ 25
Měrná práce úběru mat.	J / mm <sup>3</sup>	1 ÷ 10	100 ÷ 1000
Příkon obráběcího stroje	kW	5 ÷ 50	~10

Tabulka č. 2: Charakteristické znaky konvenčního a nekonvenčního obrábění [15]

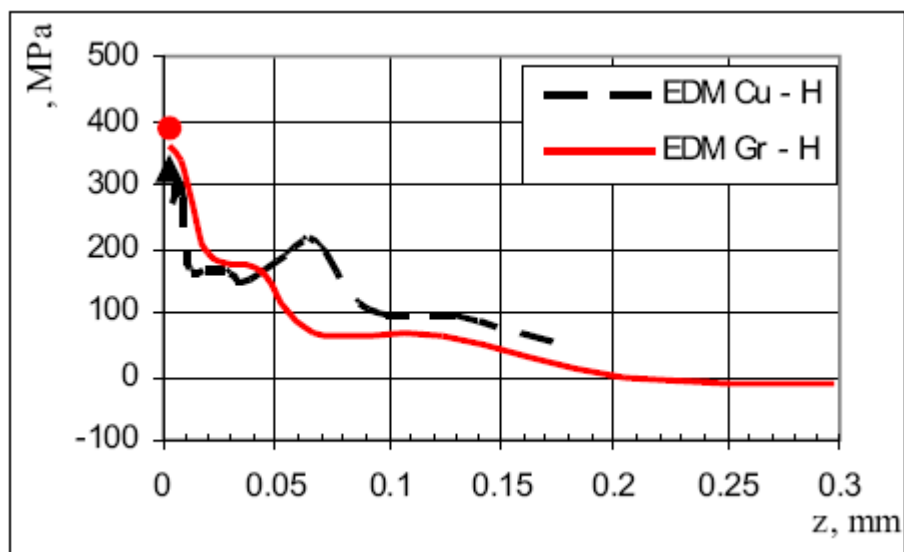
Charakteristika	Frézování	EDM obrábění
Úběr materiálu	vynikající	uspokojivé
Přesnost rozměru obrobené plochy)*	dobré	vynikající / špatné
Drsnost obrobeného povrchu)*	dobré / uspokojivé	dobré / špatné

)\* - vztahuje se na hrubovací / dokončovací operace

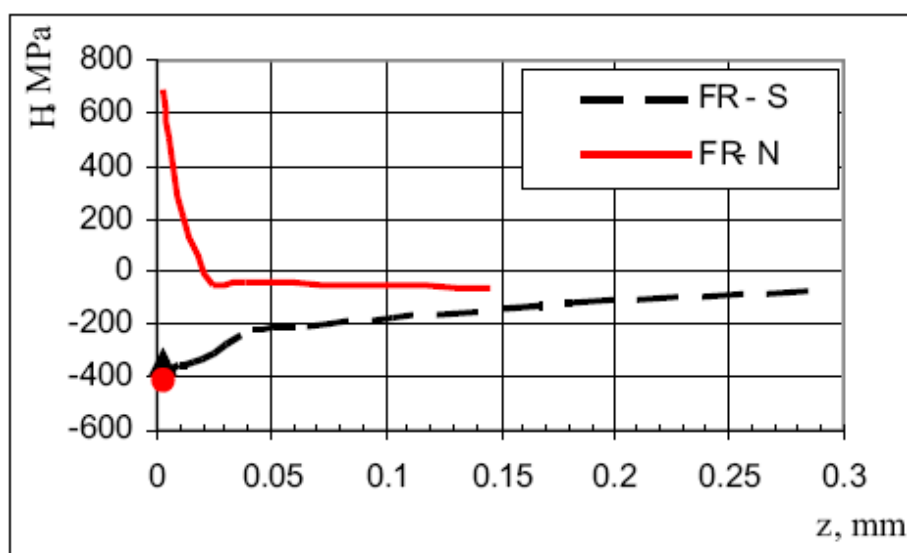
Pořizovací cena obráběcích strojů si je rovnocenná, ovšem nákup tohoto stroje lze doporučit pouze v případě, že stroj bude plně využit. V případě obrábět jen malé části forem touto technologií zřídka, je vhodnější nechat si opracovat požadovanou část dodavatelským způsobem.

Technologii EDM lze jako alternativu doporučit. Je ale nutné podrobit sousedící plochy obrobené různými technologiemi podrobnějšímu zkoumání pnutí povrchových a podpovrchových vrstev. To by mohlo způsobit nižší životnost formy (v případě

nesouhlasných pnutí), projevující se praskáním na rozhraní těchto obrobených ploch. Ze studie [19] vyplývá, že použitím grafitové a měděné elektrody při EDM obrábění (graf č. 1), nebo nesousledném frézování (graf č. 2), v povrchové vrstvě zůstávají tahová napětí, zatímco sousledné frézování do povrchové vrstvy zanáší napětí tlaková (přičemž zcela záleží na použitých parametrech frézování). Studie zbytkové napjatosti vychází z měření mechanickou (spojitá křivka) a rentgenografickou metodou (diskrétní hodnoty v levé části grafu).



Graf č. 1: Průběhy zbytkových napětí v povrchových vrstvách vzorků hloubených elektroerozivní měděnou a grafitovou elektrodou – hrubování. [19]



Graf č. 2: Průběhy zbytkových napětí v povrchových vrstvách po frézování – sousledně S / nesousledně N. [19]

## 6 Realizace experimentu

Realizace experimentů probíhala v externích firmách, přičemž tyto experimenty byli především koncipovány takovým způsobem, aby vyhověli primárním požadavkům firmy. Vědecká část byla až druhořadým aspektem. Přesto lze víceméně i takto získané výsledky vhodně využít.

### 6.1 Použitý stroj

Experimenty byly realizovány na dvou zkušebních vzorcích téhož materiálu. Každý ze vzorků byl obráběn na jiném stroji, v jiné firmě. Zkušební vzorek s experimenty č. 1-7 byl obráběn na 5-ti osém stroji od výrobce DECKEL MAHO typ DMU 60 monoBLOCK (obr. 16), s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530. Parametry stroje uvádí tabulka č. 3. Stroj vlastní polská firma v Poznani.



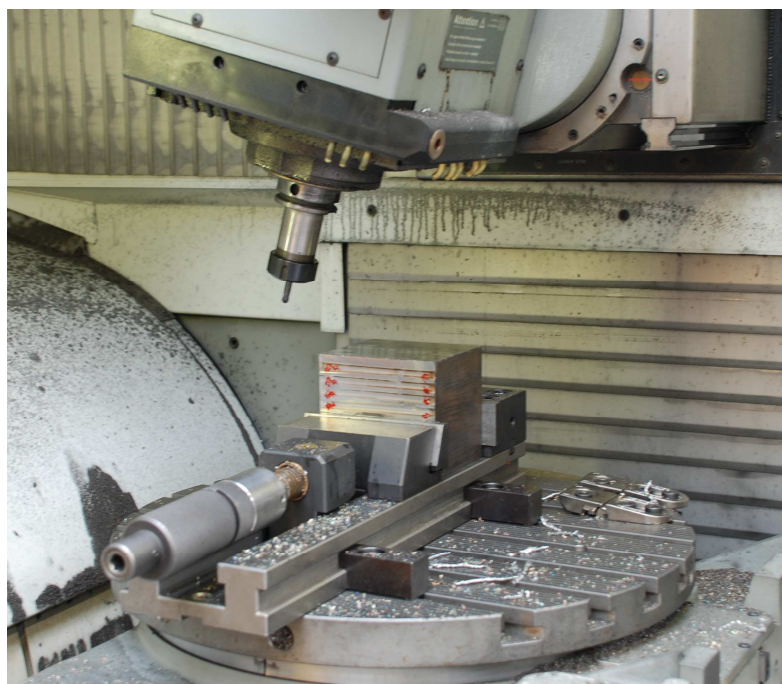
*Obr. 16 : Vysokorychlostní obráběcí centrum DMU 60 [20]*



Stroje poměrně nové řady DMU monoBLOCK® se svou maximální flexibilitou ve své třídě vynikají několika specifiky. Ve standardní dodávané verzi mají 5 os, v rámci modulárního systému mohou být rozšířena vřetenem s možností otáček v rozsahu od 10000 ot / min až po 42000 ot / min. Mají rychlé a dynamické NC-otočné frézovací hlavy (B-osa), s velkým rozsahem otočení i na negativní úhel do 30 °. Disponují rychlým NC otočným stolem (C-osa). Tyto inovované stroje lze použít v široké škále univerzálního vysokorychlostního obrábění s maximálním využitím stroje.

*Tabulka č. 3: Technická data a parametry stroje Deckel Maho DMU 60 [21]*

Technický údaj	Jednotka	Hodnota
Počet os	[-]	5
Rozsah X- / Y- / Z-osa	[mm]	730/560/560
Maximální otáčky	[min <sup>-1</sup> ]	24 000
Výkon / krouticí moment (při 18 000 ot.min <sup>-1</sup> )	[kW / N.m]	35 / 119
Maximální pracovní posuv	[m/min]	30
Rychloposuv	[m/min]	80
Maximální hmotnost obrobku	[kg]	700
Otočný stůl (C-osa), otáčky / zrychlení	[min <sup>-1</sup> ] / [° / s <sup>2</sup> ]	40 / 2000
Náklon vřeten (B-osa)	[°]	+30 / -120
Řídící systém	Control Heidenhain iTNC 530	
	Control Heidenhain MillPlus iT V600	
	Control Siemens 840D solutionline	



*Obr. 17: Realizace experimentu na stroji DMU 60*

Druhý vzorek s experimenty č. 8-13 byl obroben na vysokorychlostním, 3-osém obráběcím centru MIKRON XSM 800 (obr. 18) . Řada XSM je odvozena od řady HSM a využívá špičkovou úroveň podávací rychlosti, akcelerace a ovládacího výkonu. Tyto náročné požadavky mohly být splněny jen díky využití nejlepších komponentů, jež jsou na světovém trhu vůbec k dispozici. Srdcem celého stroje je řídicí jednotka XSM, která je charakterizována jak vysokou rychlostí zpracování, tak svými schopnostmi. Co tento systém činí jedinečným, je schopnost automatické úpravy dynamických parametrů stroje jako funkce dané aplikace.



*Obr. 18: Vysokorychlostní obráběcí centrum Mikron XSM 800 [22]*

Přehled parametrů stroje XSM 800 jsou uvedeny v tabulce č. 4. Náklon nástroje vůči obrobku byl v tomto případě realizován pomocí naklápěcího „svěráku“, na kterém byl upnut obrobek. V případě opakované budoucí realizace podobného experimentu (výroby) na tomto stroji lze doporučit, nahradit tento způsob upnutí a ustavení obrobku kvalitním upínacím stolem s náklonem, který zaručí jistější upnutí obrobku ve stroji a lepší tuhost soustavy nástroj-obrobek. Použitý stroj vlastní česká firma PWO Unitools.

Tabulka č. 4: Technická data a parametry stroje Mikron XSM 800 [23]

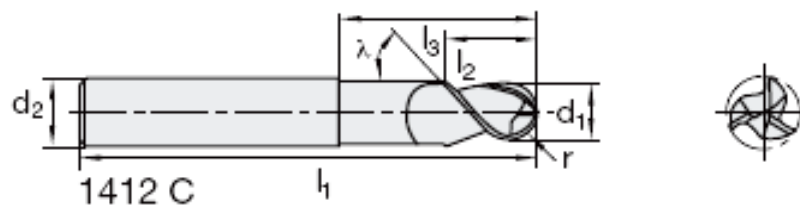
Technický údaj	Jednotka	Hodnota
Počet os	[-]	3
Rozsah X- / Y- / Z-osa	[mm]	800/600/500
Maximální otáčky(vřetení HSK-E50)	[min <sup>-1</sup> ]	36 000
Výkon / krouticí moment (při 40% ED, S6)	[kW / N.m]	32 / 20
Maximální pracovní posuv (X,Y,Z)	[m/min]	22
Rychloposuv (X,Y,Z)	[m/min]	80
Maximální hmotnost obrobku	[kg]	1000
Upínací plocha	[mm]	900 x 600
Řídící jednotka	Heidenhain iTNC 530 2P	



Obr. 19: Realizace experimentu č.8-13 na stroji Mikron XSM 800

## 6.2 Použitý nástroj

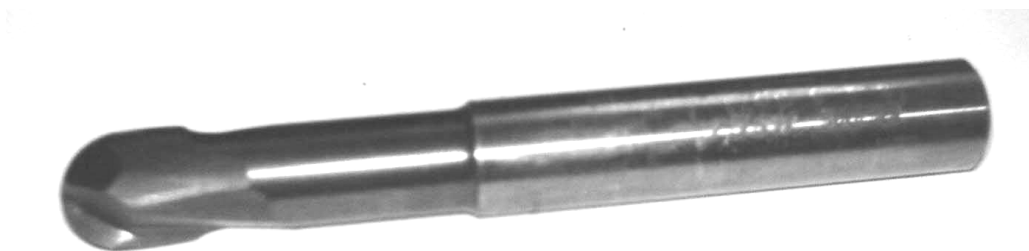
Všechny vzorky byli obráběny kulovou (označovanou také jako fréza s plným rádiusem), kopírovací, dokončovací, celokarbidovou frézou Fette, série „HSCline“ (obr. 21). Je vyrobená z materiálu LC620T a výhradně se používá s povlakem AL2 Plus, který výrobce označuje jako „diamantový“ povlak. Vyrábí se v krátkém provedení Short, dlouhém provedení Long nebo Extra Long, s 2 ÷ 4 zuby, v průměrech 2 ÷ 20 mm, se stoupáním šroubovice  $\lambda = 20^\circ$ . Geometrické parametry nástrojů použitých v experimentech uvádí tabulka č. 5.



Obr. 20: Geometrie použitého nástroje [6]

Tabulka č. 5: Geometrické rozměry použitých nástrojů

Nástroj č.	Experiment	$d_1$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$d_2$ h6	$z$	$r$
1-5	1 – 11	8	63	8	27	8	2	4
6	12, 13	12	83	12	38	12	2	6



Obr. 21: Kulová dokončovací fréza Fette HScline 1412C,  $\varnothing 8$  mm

Z katalogových údajů vychází tabulka č. 6, která udává výrobcem doporučené řezné podmínky pro použitý nástroj, pro obrábění za sucha, bez náklonu nástroje.

Tabulka č. 6: Výrobcem doporučené řezné podmínky [6]:

$n$	$v_c$	$f_z$	$v_f$	$a_e$	$a_p$
$\text{min}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	mm	$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	mm	mm
15000	300	0,13	4000	0,2	0,2

## 6.3 Použitý materiál

Jako zkušební vzorky byly použity 2 ocelové „kostky“ z materiálu ČSN 19 573 (EN 1.2379) s předepsaným tepelným zpracováním zakalení, s požadovanou tvrdostí 62 HRC. Experimentální měření tvrdosti zkušebních vzorků však tuto hodnotu nepotvrdilo. Skutečná průměrná tvrdost materiálu byla (po zaokrouhlení na celé číslo) 54 HRC pro experiment č. 1–7, dále 58 HRC pro materiál experimentu č. 8-13. Chemické složení materiálu uvádí tabulka č. 8 [24], základní mechanické vlastnosti tabulka č. 9 [25].

*Tabulka č. 7: Ekvivalentní značení oceli dle různých norem:*

Značka oceli dle ČSN	Značka oceli dle EN nebo EN ISO	Číslo materiálu W.Nr.
19 573	X153CrMoV12	1.2379

*Tabulka č. 8: Chemické složení materiálu X153CrMoV12 dle EN ISO4957:*

Označení materiálu dle:	Střední chemické složení (% hm.)								
EN ISO 4957	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	W	V	S
X153CrMoV12	1,55	0,3	0,3	12,0	0,7	0,18	0,18	0,8	0,013

Jedná se o ledeburitickou chromovou ocel, která se vyznačuje odolností proti opotřebení a deformaci, dobrou lešitelností a vysokou pevností v tlaku. Dále vysokou otěruvzdorností, vysokou houževnatostí, výbornou prokalitelností a rozměrovou stálostí. Je kalitelná na vzduchu, vhodná k nitridaci v lázni, plazmou a v plynu. Tato ocel je na celém světě nejpoužívanější 12-ti % chromovou ocelí. Materiál 1.2379 kvalitněji nahrazuje materiál 1.2080 (19 436). S tímto materiálem byl v Evropě sloučen materiál 1.2601 (z USA normy D2).

Materiál je vhodný pro použití na řezné nástroje s vyšší houževnatostí, průmyslové nože, nože pro stříhání plechů do tloušťky 6 mm, či lisovací nástroje, vysoce výkonné střížné nástroje (matrice, razníky) na stříhání silnějších a tvrdších materiálu (do cca 10 mm), kde se vyžaduje vysoká odolnost proti otěru a zároveň dobrá houževnatost nářadí. Využívá se pro konstrukci průtlačných, tažných a hlubokotažných nástrojů, lisovací techniku, válcování závitů, výrobu měřidel, výrobu forem na plasty u kterých se

vyžaduje vysoká odolnost proti otěru, lisovací nástroje pro keramický průmysl, či nástroje pro opracování dřeva.

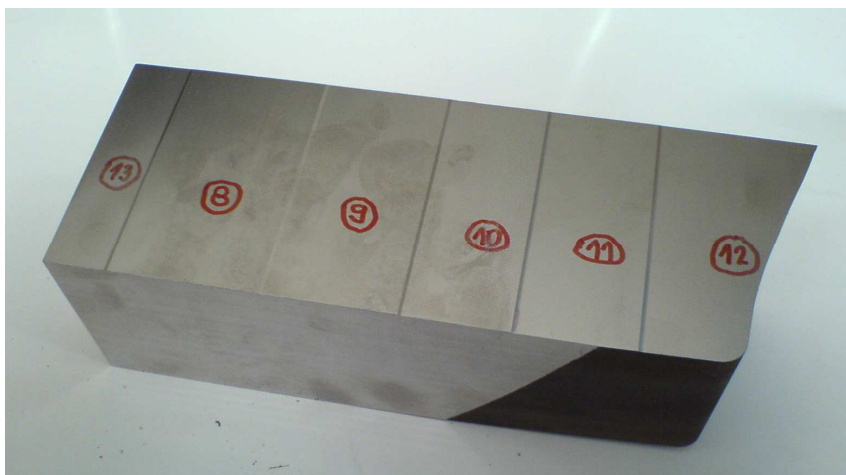
*Tabulka č. 9: Hodnoty fyzikálních veličin použitého materiálu*

Dosažitelná tvrdost	61 ÷ 63 HRC
Pevnost v tlaku $R_m$	56 HRC = 2700 MPa 60 HRC = 2960 MPa 62 HRC = 3100 MPa
Hustota	7720 kg.m <sup>-3</sup>
Tepelná vodivost	$\cong 20 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Tepelná roztažnost	100°C = $10,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 300°C = $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 600°C = $12,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Samotný výrobce oceli uvádí dosažitelnou tvrdost po zakalení 61-63 HRC (viz tab. 9). Nízká hodnota naměřené tvrdosti je jednoznačně způsobená neodborným kalením materiálu, což může mít v praxi výhradně negativní důsledky na životnost nástroje, který je z tohoto materiálu vyroben. Doporučené tepelné zpracování od výrobce udává tabulka č. 10 [25].

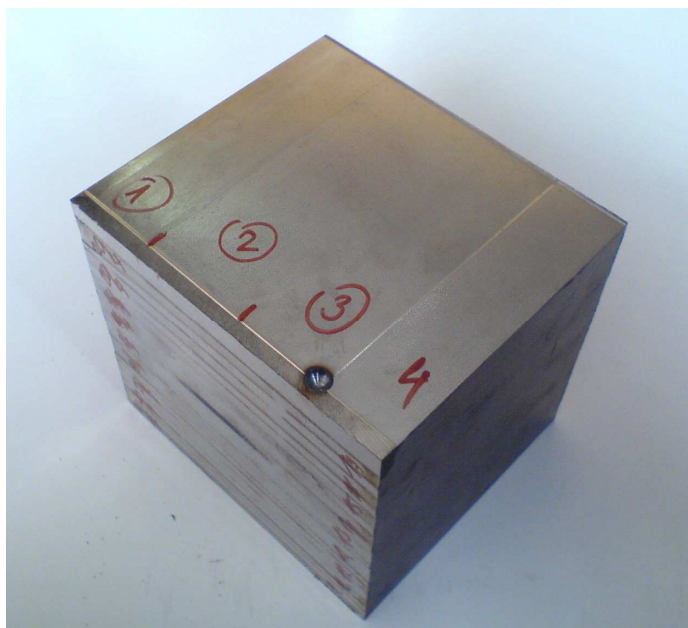
*Tabulka č. 10: Doporučené tepelné zpracování použitého materiálu*

Teplota tváření	1050 – 850°C
Žhánění na měkko	830 – 860°C
Žhánění na odstranění vnitřního pnutí	650 – 680°C
Kalení	1060 – 1080°C olej
Popouštění	200 – 550°C ( 2 – 3x 2hod )



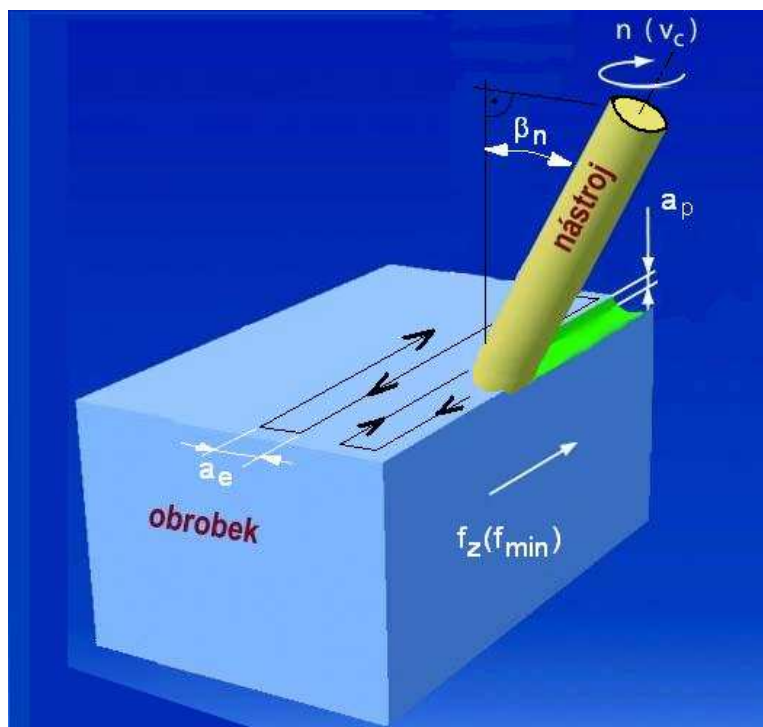
*Obr. 22: Zkušební těleso experimentu č. 8-13 (plocha ~190 x 70 mm)*





Obr. 23: Zkušební těleso experimentu č. 1-7 (plocha  $\sim 125 \times 110$  mm).  
Experiment č. 5-7 je na spodní stěně tělesa.

## 6.4 Experimentální obrobení zkušebních ploch



Obr. 24: Schématické znázornění frézování nástrojem nakloněným kolmo ke směru posuvu [26]

Každá ze zkoumaných ploch byla obrobena stejným způsobem, dle obr. 24. Aby se předešlo změně drsnosti obrobene plochy vlivem otupení nástroje, byli vzorky obrobeny celkem 6 kusy fréz, přičemž 4 frézy byli s průměrem 8 mm, další 2 s průměrem 12 mm. Pro srovnání bylo 5 ploch obrobena s nulovým náklonem nástroje, zbylých 8 s bočním náklonem nástroje  $\beta_n = +15^\circ$ . Parametry jednotlivých experimentů uvádí následující tabulka č. 11. Před frézováním nové zkušební plochy byl nástroj-břit pečlivě prohlédnut, aby se zamezilo obrábění otupeným či poškozeným nástrojem. Všechny plochy byly obráběny výhradně „za sucha“, tedy bez přítomnosti procesní kapaliny.

*Tabulka č. 11: Technologické parametry jednotlivých experimentů*

č. vzorku	Průměr frézy	Úhel náklonu	Řezná rychlost	Efektivní řezná rychlost	Posuv na zub	Krok frézy	Poznámka	
	d	$\beta_n$	$v_c$	$v_{cef}$	$f_z$	$a_e$		
	[mm]	[°]	[m·min <sup>-1</sup> ]	[m·min <sup>-1</sup> ]	[mm]	[mm]		
1	8	15	336	171	0,15	0,15	fréza č.1	kombinovaně
2	8	15	336	171	0,3	0,3	fréza č.1	
3	8	15	605	308	0,3	0,3	fréza č.1	
4	8	0	605	164	0,3	0,3	fréza č.1	
5	8	0	252	68	0,1	0,1	fréza č.2	
6	8	0	252	68	0,15	0,15	fréza č.2	
7	8	0	252	68	0,2	0,2	fréza č.2	
8	8	15	336	171	0,15	0,15	fréza č.3	jen sousledně
9	8	15	605	308	0,3	0,3	fréza č.4	kombinovaně
10	8	15	806	411	0,3	0,3	fréza č.4	
11	8	15	907	462	0,3	0,3	fréza č.5	
12	12	15	1210	563	0,3	0,3	fréza č.6	
13	12	0	378	68	0,2	0,3	fréza č.6	



## 7 Vyhodnocení experimentu

V první fázi studie bylo samotné měření drsnosti povrchu. Z naměřených hodnot bylo nutné statistiky vyloučit hrubé chyby měření. Hodnoty považované za hrubé chyby bylo nutné nahradit nově naměřenými a provést korekce nevyhovujících hodnot v tabulce měření.

### 7.1 Hodnocení 3D-textury



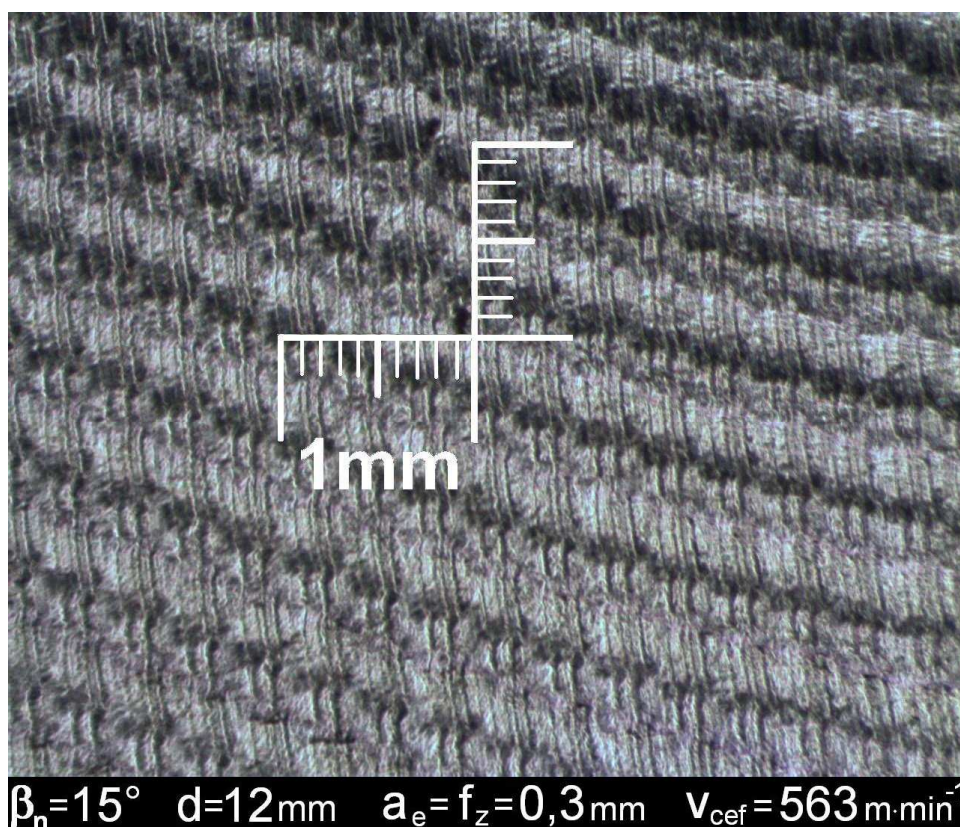
*Obr. 25: Mikroskop Intraco Micro s digitální kamerou*

Pro posouzení rozdílů obrobených ploch nástrojem s náklonem a bez náklonu, byl využit laboratorní mikroskop (respektive digitální lupa) firmy INTRACO Micro s 5-ti násobným zvětšením, vybavený digitální kamerou a polarizačním filtrem, eliminující odlesky sledovaného povrchu (obr. 25). Tento systém umožňuje pozorovat vzorek přímo na monitoru počítače a pořizovat fotografie ve vysokém rozlišení. Díky této

kombinaci bylo možné vizuálně prohlížet 3D-texturu obrobených ploch (její morfologii) a navzájem je porovnávat.

Pro zdůraznění tvarového reliéfu plochy, byly fotografie povrchů pořízeny pod úhlem od  $20^\circ$  do cca  $45^\circ$  od kolmice k povrchu. Toto snímání umožnilo zviditelnění výstupků a převýšení oproti prohlubním. Současně se snímek povrchu byla vyfotografována kalibrační měrka, podle které bylo v grafickém softwaru do fotografie přikresleno měřítko.

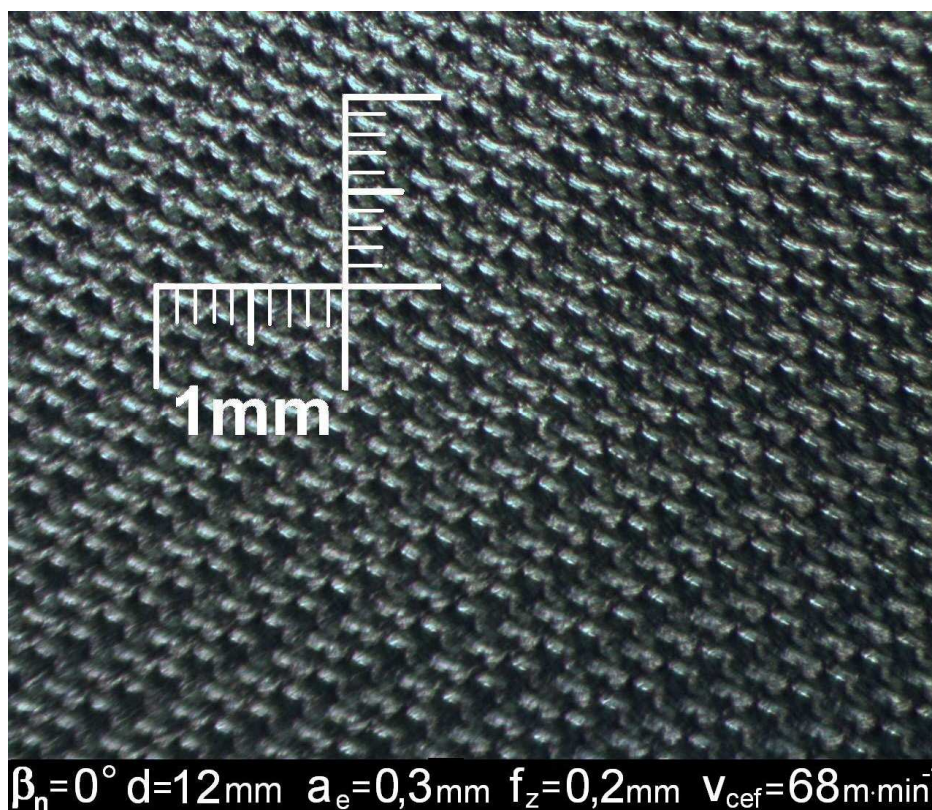
Studium vzhledu povrchů jednoznačně ukázalo, že lepších výsledků dosahuje plocha obrobená nakloněným nástrojem, která vykazuje podstatně lepší celistvost bez vystupujících částí (obr. 26), oproti ploše obrobené nástrojem nenakloněným, kde jsou jasně zřetelná místa s ostrými výčnělky (obr. 27).



*Obr. 26: Obrobená plocha č.12, zvětšení 5x  
( $n = 32000 \text{ min}^{-1}$ ,  $f_{min} = 19200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $a_p = 0,15 \text{ mm}$ )*

V případech obrábění nakloněným nástrojem experimentu č. 8-12 lze vždy pozorovat strukturu povrchu důlkovou, hladce zaoblenou, bez výrazných vyčnívajících částí. Toto neplatí u obrábění nástrojem bez náklonu (obr. 27), po kterém se tvoří hrubá

stopa vytrhaných částí obráběného materiálu – tzv. „chlupatění“. Hustota těchto výčnělků je závislá na kroku frézy a posuvové rychlosti.

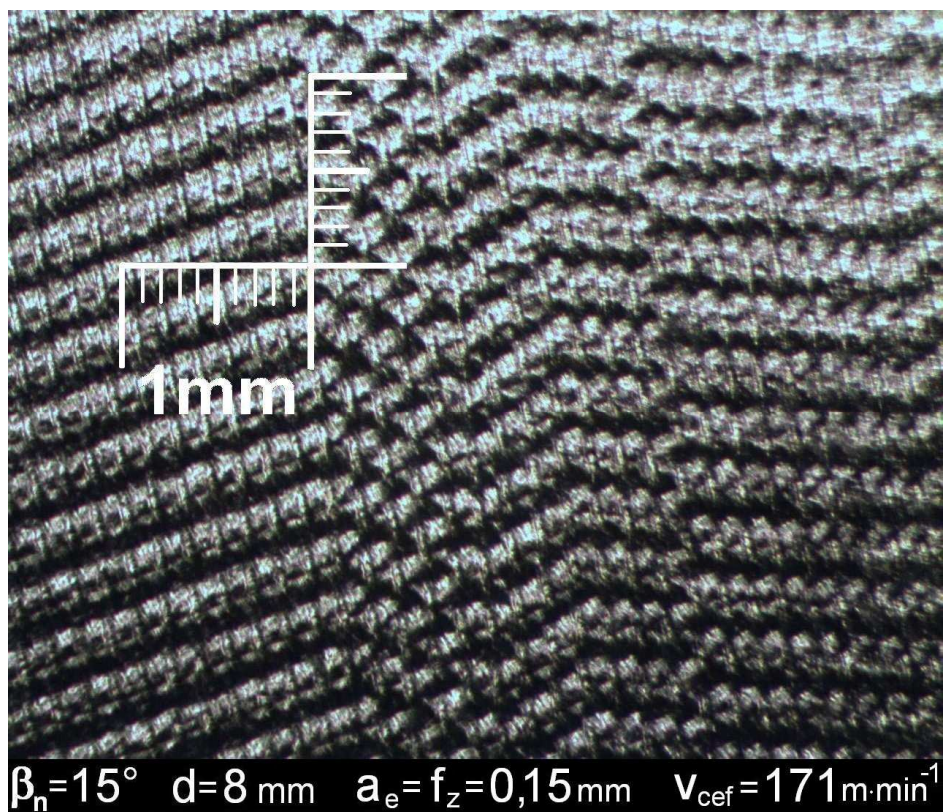


*Obr. 27: Obrobená plocha č.13, zvětšení 5x  
( $n = 10000 \text{ min}^{-1}$ ,  $f_{min} = 4000 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,  $a_p = 0,15 \text{ mm}$ )*

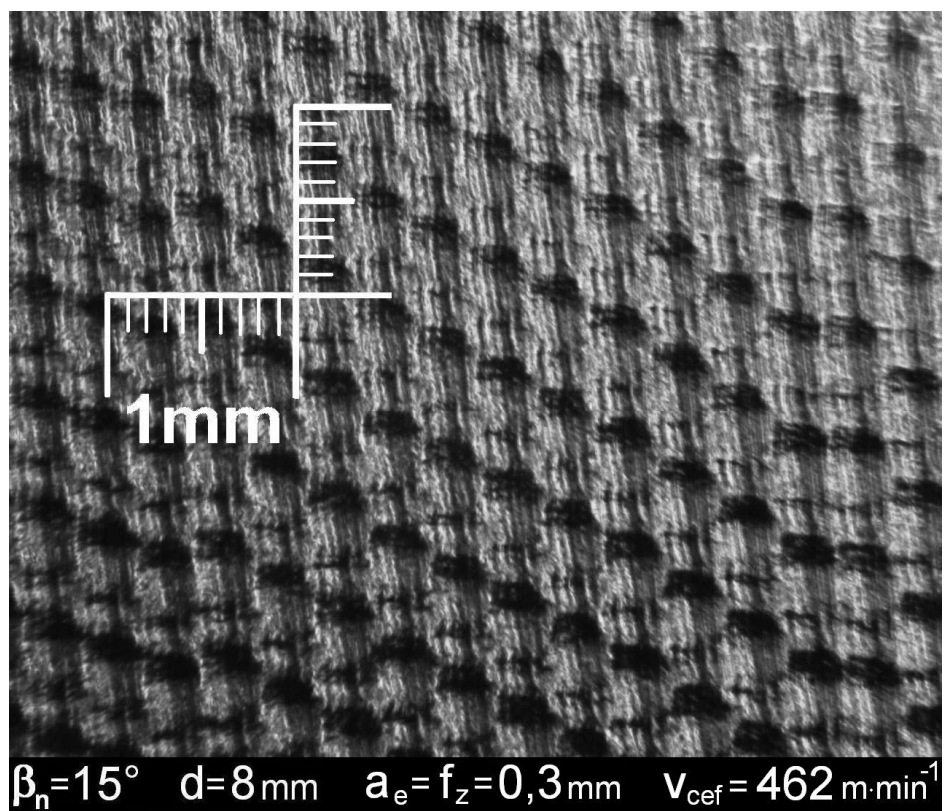
Zajímavé je také srovnání povrchu experimentu č.8 (obr. 28) - obrobený klasickými řeznými rychlostmi ( $v_{cef} < 200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ), s experimentem č.11 (obr. 29) – obrobený vysokorychlostní technologií ( $v_{cef} > 400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $f_{min} > 20 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Zatímco vzorek č. 8 byl frézován s jemným krokem frézy  $a_e = 0,15 \text{ mm}$  (posuvem na zub  $f_z = 0,15 \text{ mm}$ ) a pro docílení lepší jakosti povrchu bylo použito pouze frézování sousledné, u vzorku č.11 bylo použito kroku frézy dvakrát větší, tedy  $a_e = 0,3 \text{ mm}$  (s posuvem na zub  $f_z = 0,3 \text{ mm}$ ), přičemž jako u zbývajících experimentů, bylo použito střídavě frézování sousledné / nesousledné (kombinované).

Vzhledem k drsnosti těchto dvou srovnávaných ploch lze konstatovat, že plochy se svým parametrem drsnosti  $R_z$  zcela ztotožňují (viz. kap. 7.2). Jak je ovšem uvedeno v kapitole 7.4, byla plocha č.11 obrobena vysokorychlostní technologií 11x rychleji. Při započítání času přejezdu nástroje při sousledném frézování u exp. č. 8 je to dokonce 23x rychlejší (!) obrábění, se stejným výsledkem jakosti povrchu.





*Obr. 28: Obrobená plocha č.8, zvětšení 5x  
( $n = 13333 \text{ min}^{-1}$ ,  $f_{min} = 4000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $a_p = 0,15 \text{ mm}$ )*



*Obr. 29 : Plocha č.11(HSM), zvětšení 5x  
( $n = 36000 \text{ min}^{-1}$ ,  $f_{min} = 21600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,  $a_p = 0,15 \text{ mm}$ )*

## 7.2 Měření drsnosti

Veškeré zjištěné hodnoty drsnosti povrchu byly naměřeny přístrojem firmy Mitutoyo, typ SURFTEST SJ – 400 (obr. 30). SJ-400 je dotykový (hrotový) přístroj pro měření drsnosti povrchů určený pro dílenské a laboratorní použití. Přístroj SJ – 400 umožňuje hodnocení struktury povrchu, vlnitosti povrchu a mnoha dalších parametrů podle různých národních a mezinárodních norem.



*Obr. 30: Přístroj pro měření - záznam drsnosti, SJ-400*



*Obr. 31: Stojan s měřícím hrotem drsnoměru SJ-400*

Přístroj sestává z měřicí jednotky (měřicího hrotu – obr. 31) umístěné na pohyblivém stojanu. Ta je propojena s měřícím přístrojem, který zpracovává signál z měřicího hrotu. Přístroj ihned zobrazuje veškerá naměřená digitální nebo grafická data na přístrojovém dotykovém LCD, umožňuje jejich ukládání na paměťovou kartu, nebo je rovnou tisknout z vestavěné tiskárny na vloženou papírovou pásku. Při měření je nutné postupovat velice opatrně, aby nedošlo k poškození citlivého snímače drsnosti (měřicího hrotu).

Parametry přístroje jsou uvedeny v tabulce č. 12. Parametry (nastavení přístroje) jsou pro všechna měření stejná a jsou shrnuty v tabulce č. 13. Některé parametry měření jsou předepsány normou ČSN 73 2520 (ISO 4287-2). Tyto předepsané parametry lze nalézt v uživatelském manuálu použitého přístroje (umístěné v příloze na CD disku).

*Tabulka č. 12: Technické parametry drsnoměru SJ-400*

Technický údaj	Jednotka	Hodnota
Nejvyšší měřicí rozsah	[ $\mu\text{m}$ ]	800( $\pm$ 400)
Rozsah posuvu snímače	[mm]	25
Měřicí síla	[mN]	4
Poloměr měřicího hrotu	[ $\mu\text{m}$ ]	5
Rozlišení	[ $\mu\text{m}$ ]	0,000125
Počet úseků – délek povrchu	[-]	1, 3, 5, L (libovolná)
Statistické filtry	[-]	2RC, PC75, GAUSS
Mezní vlnová délka	[mm]	0,08; 0,025; 0,8; 2,5; 8
Podporované normy	JIS-B-0601-1994	
	JIS-B-0601-1982	
	DIN, ISO, ANSI apod.	

*Tabulka č. 13: Parametry měření (nastavení přístroje)*

Parametr měření	Hodnota
Norma	ISO1997
Hodnocený profil	R(profil drsnosti)
Statistický filtr	GAUSS(Gaussův)
Délka hodnoceného povrchu	4,0 mm
Mezní délka $\lambda_c$	0,8 mm
Měřicí rozsah	800 $\mu\text{m}$
Rychlost měření	0.5mm/s
Rychlost zpětného posuvu	1mm/s
Rřejezd před/za měřením	zapnutý
Kompenzace sklonu	celý profil
Kompenzace oblého povrchu	vypnuto
Zpětný chod snímače	zapnuto
Snímací hrot	standardní(běžný) hrot
Posuvná jednotka	zapnuta



Ze statistických výpočtů (viz kapitola 4.2) naměřených veličin byla sestavena tabulka jednotlivých drsností parametru  $R_z$  (tab. č. 14) a jejich grafické zpracování je zařazeno v příloze (kapitola č. 11). Kompletní soubor naměřených hodnot  $R_a$ ,  $R_{sk}$  a  $R_z$ , a tabulka naměřených hodnot (včetně nejistot měření a směrodatných odchylek) je umístěna na přiloženém disku CD disku. Pro hodnocení sledovaných povrchů lze ale pouze uvažovat průměrné hodnoty parametru drsnosti, tak jak se tomu běžně užívá v praxi.

Pro posouzení závislosti drsnosti na začátku a na konci obrábění každé experimentální plochy byla sestavena následující tabulka. Červeně podbarvené hodnoty značí zhoršení parametru  $R_z$  na výstupu vůči vstupu, zelené naopak. Začátkem a koncem (resp. vstupem a výstupem) je myšlen začátek a konec trajektorie nástroje.

Tabulka č. 14: Závislost parametru drsnosti na začátku a konci obrobené plochy

č.vzorku	příčně	podélně	příčně	podélně	Nástroj
	vstup		výstup		
	R <sub>z</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>z</sub>	R <sub>z</sub>	
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	
1	3,68	3,50	4,15	3,68	1
2	7,40	6,25	5,68	5,63	
3	5,32	6,63	6,90	8,70	
4	14,65	9,47	19,55	12,10	
5	7,78	6,68	7,70	8,37	2
6	15,12	8,92	11,48	6,77	
7	10,95	7,48	6,92	6,00	
8	3,53	2,28	3,12	2,55	3
9	3,65	3,52	4,85	4,02	4
10	4,30	6,62	6,67	5,12	
11	3,67	2,32	4,05	2,62	5
12	3,42	2,38	2,85	2,10	6
13	3,75	3,55	4,07	3,10	

Zhoršení parametru	Zlepšení parametru
--------------------	--------------------

Z tohoto srovnání nelze vysledovat žádnou podstatnou závislost zhoršení / zlepšení drsnosti ve vztahu k času obrábění nebo ve vztahu k obrábění s náklonem či bez něj. Naměřené drsnosti povrchů na vstupu a výstupu dráhy obrobené plochy nevykazují viditelnou závislost na opotřebením nástroje (nelze sledovat jejich vzrůstající či klesající hodnotu). Vliv kvality a jakosti povrchu vzhledem k době používání nástroje je

nepopiratelný, ovšem v těchto experimentech se nepotvrdil – což je dáno hlavně poměrně malými rozměry obráběných ploch jednotlivých experimentů (cca 15÷25 cm<sup>2</sup> na experiment).

Fakt, že trvanlivost nástroje není předmětem zájmu tohoto zkoumání (a tento parametr nebyl nijak charakterizován), je vhodné naměřené hodnoty na vstupu a výstupu sloučit aritmetickým průměrem do jedné hodnoty: drsnosti podélné a příčné. Z těchto hodnot aritmetických průměrů byly sestaveny grafy  $R_z = f(v_{cef})$  a  $R_z = f(f_z)$ , umístěné v příloze.

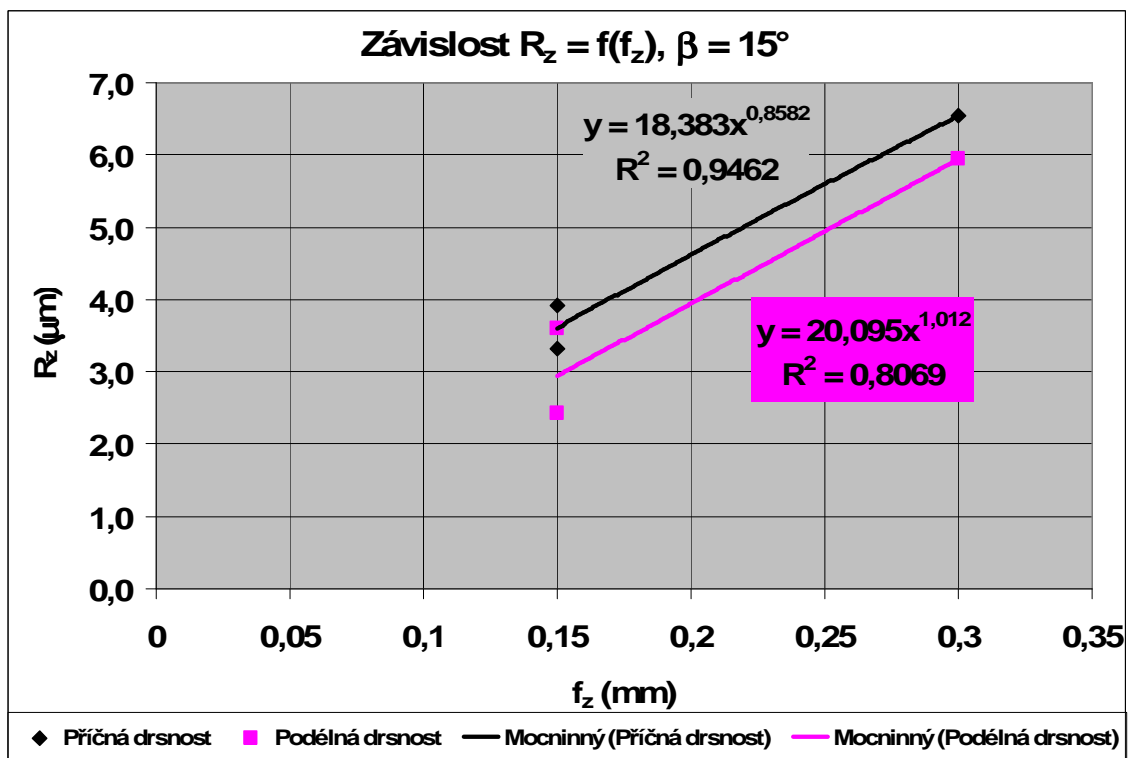
### 7.3 Stanovení statistické rovnice drsnosti povrchu

Jednou z metod jak určit výslednou drsnost povrchu po frézování, jsou teoretické empirické vztahy, vycházející z geometrických parametrů nástroj-obrobek. Tento systém ovšem produkuje pouze orientační výsledky, přičemž skutečná hodnota drsnosti povrchu se může od teoretické podstatně lišit. Možností je vytvořit z experimentálních poznatků funkční vzorec, který numerický výpočet podstatně zpřesní. Na tomto principu je založena metoda nejmenších čtverců. Postup výpočtu by měl být univerzální, zatímco konkrétní vztah bude platit pouze pro přesně specifikovaný režim obrábění – náklon, posuvy, řezná rychlost, materiál obrobku, použitý nástroj atd. [27]

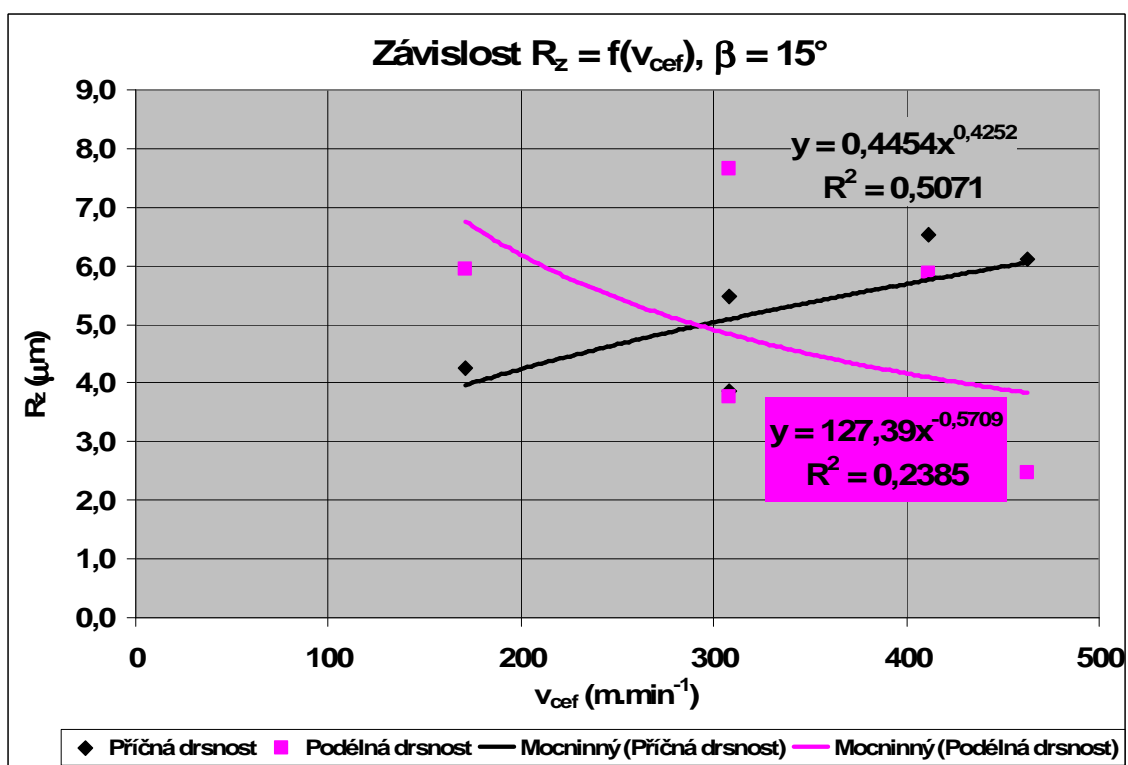
Z naměřených hodnot byly sestaveny grafy (č. 4-6) závislosti drsnosti  $R_z$  na posuvu na zub  $f_z$  a efektivní řezné rychlosti  $v_{cef}$ . Hlavním cílem je stanovit univerzální postup pro tvorbu analytického početního vzorce.

Vzhledem k malému souboru předložených experimentálních hodnot je funkční vztah odvozen pouze pro konkrétní případ obrábění (konkrétním nástrojem, přesně specifikovaného materiálu a technologických podmínek) vycházející pouze z vhodného výběru některých naměřených hodnot. V úvahu připadá experiment č. 1-3, 8-11 – pro případ obrábění nakloněným nástrojem, a za určitých podmínek i experiment č. 4-7 pro případ obrábění nástrojem bez náklonu. Experimenty č. 12 a 13 jsou zanedbány – z důvodu použití nástroje s odlišným průměrem.

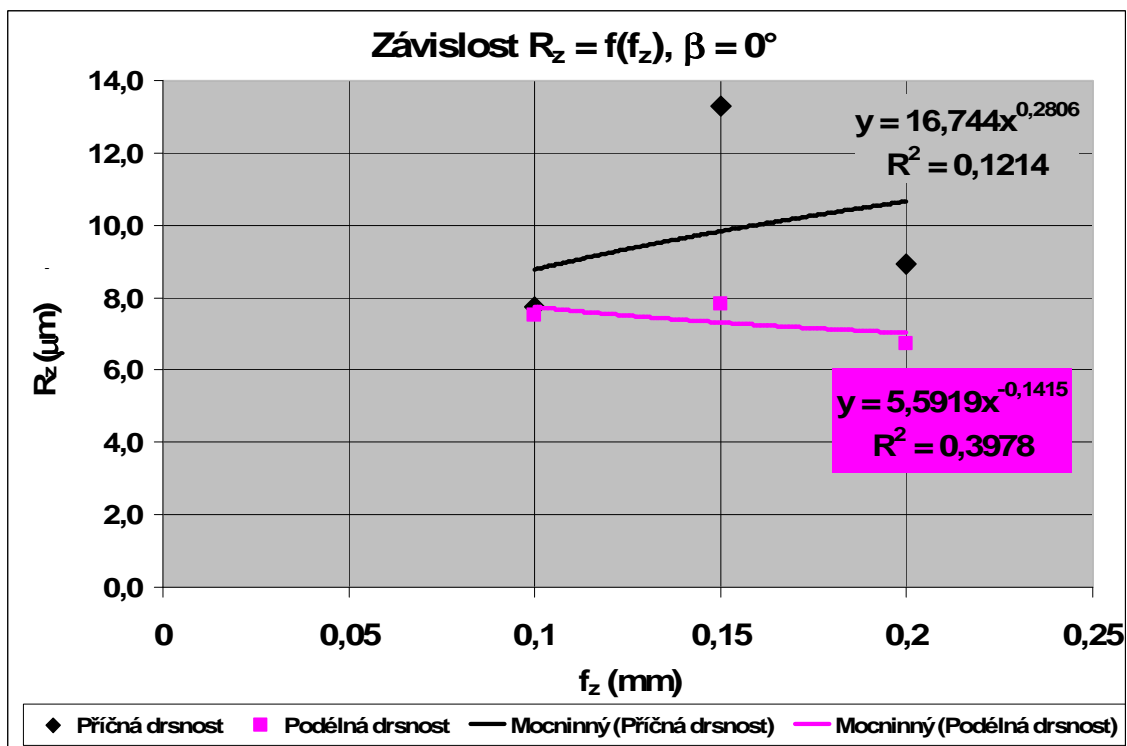




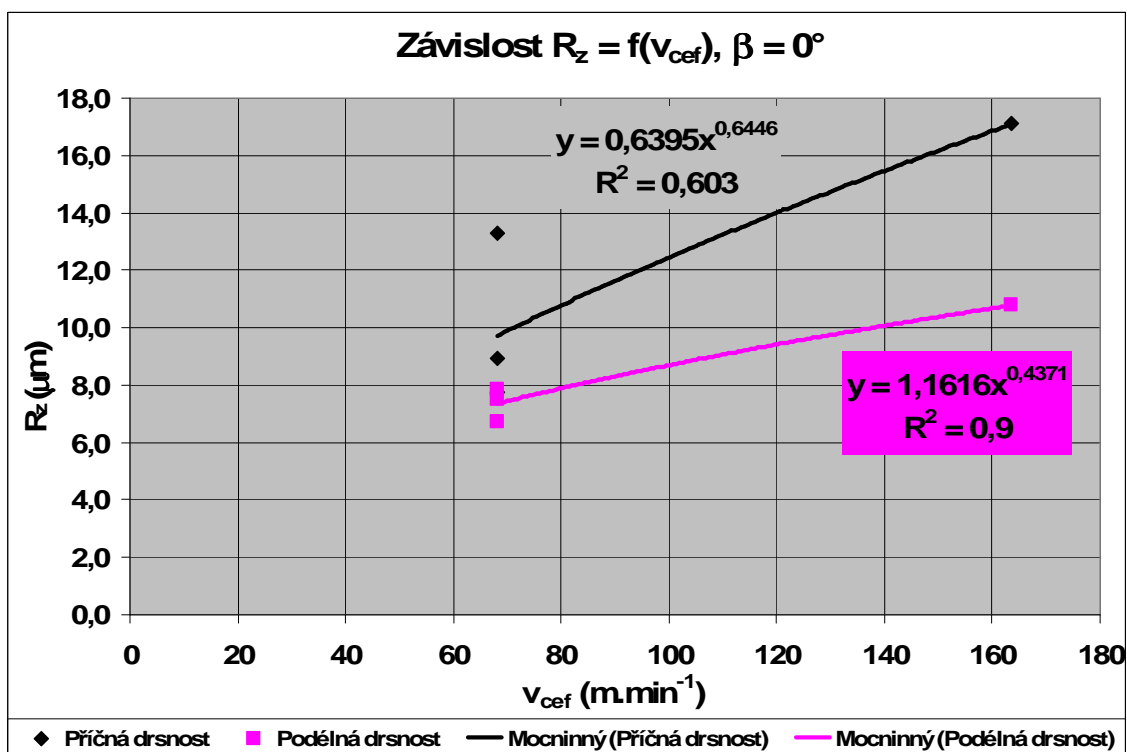
Graf č. 3: Závislost  $R_z$  na  $f_z$  nástroje s náklonem



Graf č. 4: Závislost  $R_z$  na  $v_{cef}$  nástroje s náklonem



Graf č. 5: Závislost  $R_z$  na  $f_z$  nástroje bez náklonu



Graf č. 6: Závislost  $R_z$  na  $v_{cef}$  nástroje bez náklonu

Naměřenými hodnotami byla v programu Office Excel proložena křivka mocninné funkce, s výpisem rovnice regrese. Tato křivka (rovnice) zastupuje závislost drsnosti na efektivní řezné rychlosti (resp. posuvu na zub) a zastupuje hodnoty, které by se dali

s určitou pravděpodobností v tomto vymezeném intervalu předpokládat. U sestavených grafů se index korelace (koeficient spolehlivosti  $R^2$ ) pohybuje v rozmezí 0,1214 (závislost velmi slabá) po 0,9462 (silná závislost). Tyto hodnoty jsou důkazem toho, že pro přesnější určení regresních rovnic je potřeba provést měření na větším souboru hodnot řezných rychlostí a pracovních posuvů.

Z teorie závislosti řezné rychlosti a teploty v místě řezu je známo, že je tato závislost vyjádřena mocninnou funkcí [27], [28]. Lze tedy předpokládat na strukturní rovnici drsnosti povrchu podobného charakteru, přičemž výhodou mocninné funkce je schopnost nahradit na určitém vymezeném intervalu i závislost lineární.

Po definici základních proměnných a jejich regresních rovnic lze přistoupit k problematice určení vzorové statické rovnice drsnosti obrobeného povrchu, která bude vycházet z rovnice teploty řezání [27], [28]. Tato základní rovnice má tvar mocninné funkce (s neznámou  $C$ ,  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) a promítá se do ní parametr hloubky řezu, řezné rychlosti a posuvu na zub. Příklad analytické rovnice pro výpočet teploty v místě obrábění je uveden níže:

$$\Theta = C_{\Theta} \cdot a_p^{x_{\Theta}} \cdot f^{y_{\Theta}} \cdot v^{z_{\Theta}} \quad (7.1)$$

Pro případ vyjádření drsnosti povrchu lze předpokládat na rovnici se závislým parametrem náklonu nástroje  $\beta_n$ , efektivním průměrem nástroje  $D_{ef}$ , hloubce řezu  $a_p$ , posuvu na zub  $f_z$  a efektivní řezné rychlosti  $v_{cef}$ , a to ve tvaru:

$$R_Z = C_{Rz} \cdot \beta_n^{W_{Rz}} \cdot D_{ef}^{Q_{Rz}} \cdot a_p^{Z_{Rz}} \cdot f_z^{X_{Rz}} \cdot v_{cef}^{Y_{Rz}} \quad (7.2)$$

, kde  $C_{Rz}$ ,  $W_{Rz}$ ,  $Q_{Rz}$ ,  $Z_{Rz}$ ,  $X_{Rz}$  a  $Y_{Rz}$  jsou konstanty vycházející z popisu příslušných rovnic. Jelikož je parametr  $\beta_n$ ,  $D_{ef}$  a  $a_p$  v použitých experimentech konstantní neměnná hodnota, lze ji z rovnice vypustit, tedy platí:

$$R_Z = C_{Rz} \cdot f_z^{X_{Rz}} \cdot v_{cef}^{Y_{Rz}} \quad (7.3)$$

V případě, že by  $\beta_n$ ,  $D_{ef}$  či  $a_p$  bylo proměnnou, ve vyjádření  $R_z$  tento parametr zůstane a celou soustavu řešení rozšíří o jednu (resp. tři) exponenciální rovnice. Stejně

tak by soustavu rozšířil každý další parametr, jehož variabilita má nějakou spojitost se změnou výsledné  $R_z$ .

Úkolem je stanovit ukázkovou rovnici pro analytický výpočet podélné, nebo příčné drsnosti, a to nástrojem s, nebo bez náklonu. Ukázkový příklad postupu stanovení statické rovnice drsnosti v příčném směru, nástrojem s náklonem  $\beta_n = +15^\circ$ , vycházející z matematického modelu metody nejmenších čtverců je následující.

Aproximační metoda nejmenších čtverců vychází ze statistických dat, přičemž hledá takové parametry funkcí f, pro které je součet čtverců odchylek vypočtených hodnot od hodnot naměřených minimální. Pro stanovení statistické rovnice drsnosti obrobeného povrchu je nutné určit konstantu  $C_{Rz}$ , s exponenty  $X_{Rz}$  a  $Y_{Rz}$ .

Rovnici s mocninnou funkcí s neznámou v exponentu je nutné řešit zlogaritmováním, tedy:

$$\log R_z = \log C_{Rz} + X_{Rz} \cdot \log f_z + Y_{Rz} \cdot \log v_{cef} \quad (7.4)$$

Při aproximaci k dané funkci metodou nejmenších čtverců se musí součet čtverců odchylek rovnat minimální hodnotě:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 &= \sum_{i=1}^n (\log R_z - \log R_{zi})^2 = \min \\ \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 &= \sum_{i=1}^n (\log C_{Rz} + X_{Rz} \cdot \log f_z + Y_{Rz} \cdot \log v_{cef} - \log R_{zi})^2 = \min \end{aligned} \quad (7.5)$$

Derivací této funkce získáme 3 rovnice o 3 neznámých, z kterých vypočítáme konstantu  $C_{Rz}$  a exponenty  $X_{Rz}$  a  $Y_{Rz}$ :

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{\partial \log C_{Rz} \cdot \partial X_{Rz} \cdot \partial Y_{Rz}} = 0 \quad (7.5.1)$$

$$1. \quad n \cdot \log C_{Rz} + X_{Rz} \sum_{i=1}^n \log f_{zi} + Y_{Rz} \sum_{i=1}^n \log v_{cefi} - \sum_{i=1}^n \log R_{zi} = 0$$

$$2. \log C_{R_z} \cdot \sum_{i=1}^n \log v_{cefi} + X_{R_z} \sum_{i=1}^n \log f_{zi} \cdot \log v_{cefi} + Y_{R_z} \sum_{i=1}^n (\log v_{cefi})^2 - \sum_{i=1}^n \log R_{zi} \cdot \log v_{cefi} = 0$$

$$3. \log C_{R_z} \cdot \sum_{i=1}^n \log f_{zi} + X_{R_z} \sum_{i=1}^n (\log f_{zi})^2 + Y_{R_z} \sum_{i=1}^n \log v_{cefi} \cdot \log f_{zi} - \sum_{i=1}^n \log R_{zi} \cdot \log f_{zi} = 0$$

Tabulka č. 15.a – Experimentální, naměřené a vypočítané hodnoty

číslo experimentu	$v_{cefi}$	$f_{zi}$	$R_{zi}$	$\log v_{cefi}$	$\log f_{zi}$	$\log R_{zi}$
1	171,3	0,15	3,92	2,234	-0,824	0,593
2	171,3	0,3	6,54	2,234	-0,523	0,816
3	308,3	0,3	6,11	2,489	-0,523	0,786
8	171,3	0,15	3,33	2,234	-0,824	0,522
9	308,3	0,3	4,25	2,489	-0,523	0,628
10	411,1	0,3	5,48	2,614	-0,523	0,739
11	462,5	0,3	3,86	2,665	-0,523	0,586
$\Sigma$	2004	1,80	33,48	16,958	-4,262	4,670

Tabulka č. 15.b – Experimentální, naměřené a vypočítané hodnoty

měření číslo	$(\log v_{cefi})^2$	$(\log f_{zi})^2$	$\log v_{cefi} \cdot \log f_{zi}$	$\log R_{zi} \cdot \log v_{cefi}$	$\log R_{zi} \cdot \log f_{zi}$
1	4,989	0,679	-1,840	1,324	-0,489
2	4,989	0,273	-1,168	1,822	-0,427
3	6,195	0,273	-1,301	1,956	-0,411
8	4,989	0,679	-1,840	1,166	-0,430
9	6,195	0,273	-1,301	1,564	-0,329
10	6,833	0,273	-1,367	1,932	-0,386
11	7,103	0,273	-1,394	1,563	-0,307
$\Sigma$	41,294	2,725	-10,212	11,327	-2,777

Po dosazení naměřených a vypočítaných hodnot z tabulky 15.a, 15.b do rovnic (7.5.1) lze sestavit soustavu 3 lineárních rovnic se 3-mi neznámými:

$$\begin{aligned}
 7 \log C_{R_z} - 4,262 X_{R_z} + 16,958 Y_{R_z} - 4,67 &= 0 \\
 16,958 \log C_{R_z} - 10,212 X_{R_z} + 41,294 Y_{R_z} - 11,327 &= 0 \\
 -4,262 \log C_{R_z} + 2,725 X_{R_z} - 10,212 Y_{R_z} + 2,777 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{7.5.2}$$

Tuto soustavu rovnic je možné vyřešit několika způsoby. V tomto případě za pomoci programu Octave verze: 2.1.50 [29], pomocí maticového počtu. Výsledné konstanty:

$$\log C_{Rz} = 2,12037 \Rightarrow C_{Rz} = 131,9 \quad (7.6)$$

$$X_{Rz} = 0,84662$$

$$Y_{Rz} = -0,38709$$

Známe-li konstanty, můžeme dosadit do obecného tvaru rovnice. Statistická rovnice pro výpočet příčné drsnosti obrobeného povrchu  $R_z$ , s proměnnou  $v_{cef}$  a  $f_z$  a specifických technologických podmínek je ve tvaru:

$$R_z = 132 \cdot f_z^{0,84662} \cdot v_{cef}^{-0,38709} \quad [\mu m] \quad (7.7)$$

Přesnost výsledků, získaných výpočtem pomocí této rovnice je tím větší, čím větší je soubor experimentálních a naměřených hodnot. Drsnoměr dovoluje měřit parametr  $R_z$  s přesností na 2 desetinná místa. Přihlédneme-li k této skutečnosti, nemá význam uvádět výsledky s vyšší přesností, než samotné měření. Dále, vzhledem k použití matematického modelu aproximace, je bezpředmětné udávat vypočítané hodnoty s tolerancí. Tuto jistotu zastupuje dříve zmíněný koeficient spolehlivosti  $R^2$ .

Dosazením hodnot posuvu  $f_z$  v intervalu  $(0,15 \div 0,3)$  mm a hodnot efektivní řezné rychlosti  $v_{cef}$  v intervalu  $(171 \div 462)$  m·min<sup>-1</sup> lze ze vztahu analyticky určit výslednou drsnost  $R_z$ . Toto platí za konstantních podmínek: nástroje s průměrem  $d = 8$  mm, náklonem  $\beta_n = +15^\circ$ , hloubkou řezu  $a_p = 0,15$  mm, přičemž krok frézy  $a_e$  je roven použitému posuvu  $f_z$ . Z hodnoty exponentů  $X_{Rz}$  a  $Y_{Rz}$  je patrné, že větší vliv na drsnost povrchu má posuv nástroje  $f_z$ , což je také v souladu s teorií obrábění.

Z takovéto statické rovnice lze také vycházet při hledání optimálního parametru ( $f_z$  nebo  $v_{cef}$ ) pro předem zadanou drsnost povrchu [28].

$$\text{Vyjádření } v_{cef} \text{ ze statické rovnice:} \quad v_{cef} = \left( \frac{R_z}{C_{Rz} \cdot f_z^{X_{Rz}}} \right)^{\frac{1}{Y_{Rz}}} \quad [m \cdot min^{-1}] \quad (7.8)$$

Vyjádření  $f_z$  ze statické rovnice:

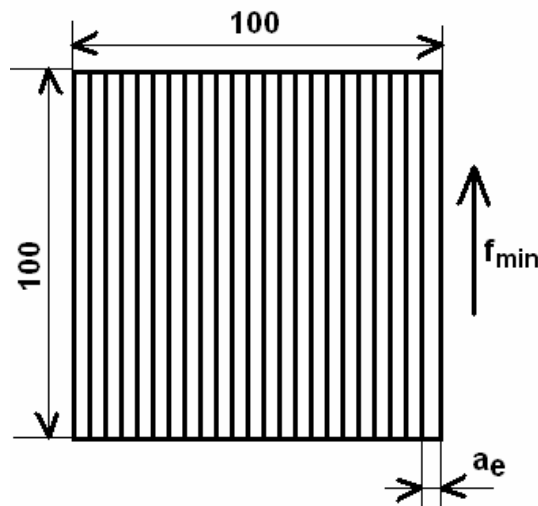
$$f_z = \left( \frac{R_z}{C_{Rz} \cdot v_{cef}^{Y_{Rz}}} \right)^{\frac{1}{X_{Rz}}} [\text{mm}] \quad (7.9)$$

Chceme-li využít tohoto výpočtu, je opět vhodné, aby se hodnoty  $f_z$  a  $v_{cef}$  pohybovaly v intervalu experimentálních hodnot.

## 7.4 Objemový / časový výkon frézování

Ze známých posuvových rychlostí, kroku frézy a hloubky řezu je sestavena orientační tabulka č. 16 obráběcích časů  $t_1$ , potřebných k obrobení plochy (100 x 100 mm), jednotné velikosti  $S_1$ , dle vzorce vycházejícího z následné teoretické úvahy (obr. 32):

$$t_1 = \frac{100}{a_e} \cdot \frac{100}{f_{\min}} [\text{min}] \quad (8.1)$$



Obr. 32: Teoretický rozbor výkonu frézování

Jinými slovy lze psát obecný vzorec pro čas ofrézování plochy obecného obsahu:

$$t = \frac{S}{a_e \cdot f_{\min}} [\text{min}] \quad (8.2)$$

,kde nezahrnujeme případné přejezdové posuvy, které by byli u všech metod stejné. Jedná se tedy o čistý čas „v řezu“. Objemový výkon frézování  $V_{\min}$  pak spočteme ze známého času frézování jednotně stanovené plochy a známé hloubky řezu  $a_p$ , tedy podíl objemu odebrané vrstvy ku času potřebnému na její obrobení.

$$V_{\min} = \frac{S_1 \cdot a_p}{t_1} \quad (8.3)$$

Tabulka č. 16: Srovnání časů obrábění a objemu odebraného materiálu

Číslo vzorku	Čas frézování plochy 100 x100 mm	Objemový výkon frézování ( $a_p = 0,15$ mm)
(-)	(min)	(mm <sup>3</sup> / min)
1	16,7	90
2	4,2	360
3	2,3	648
4	2,3	648
5	<b>50,0</b>	<b>30</b>
6	22,2	68
7	12,5	120
8	16,7	90
9	2,3	648
10	1,7	864
11	<b>1,5</b>	<b>972</b>
12	1,7	864
13	8,3	180



## 8 Diskuze výsledků

Porovnávání textury povrchů pod mikroskopem (kap. 7.1) ukázalo, že nejvýhodnější 3D struktury povrchů zůstaly po experimentech obrábění s nakloněným nástrojem (nejlépe vzhlížející experiment č.11 – obrábění HSM – bez viditelných převýšení). Z hlediska drsnosti povrchu dosáhlo nejlepších výsledků čistě sousledné frézování experimentu č.8, ale s téměř stejným výsledkem i experiment č.11 (režim HSM). Z hlediska výkonnosti a rychlosti frézování dosahuje nejlepšího úběru materiálu za jednotku času opět experiment č.11 (režim HSM).

Tabulka č. 17: Srovnání výsledků (zeleně jsou označeny nejlepší výsledky)

Efektivní řezná rychlost $V_{cef}$	Posuv na zub $f_z$	Průměr nástroje $d$	Číslo vzorku	Náklon nástroje $\beta_n$	3D textura povrchu	Objemový výkon frézování ( $a_p = 0,15 \text{ mm}$ )	Drsnost povrchu $R_z$	
							Příčná	Podélná
( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	(mm)	(mm)	(-)	( $^\circ$ )	(-)	( $\text{mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )
171	0,15	8	1	15	BEZ VRCHOLŮ	90	3,92	3,59
171	0,3	8	2	15	ZAOBLENÉ VRCHOLY	360	6,54	5,94
308	0,3	8	3	15		648	6,11	7,67
164	0,3	8	4	0	OSTRÉ VRCHOLY	648	17,10	10,78
68	0,1	8	5	0		30	7,74	7,53
68	0,15	8	6	0		68	13,30	7,84
68	0,2	8	7	0		120	8,93	6,74
171	0,15	8	8	15	BEZ VRCHOLŮ	90	3,33	2,42
308	0,3	8	9	15	ZAOBLENÉ VRCHOLY	648	4,25	3,77
411	0,3	8	10	15		864	5,48	5,87
462	0,3	8	11	15	BEZ VRCHOLŮ	972	3,86	2,47
563	0,3	12	12	15		864	3,13	2,24
68	0,2	12	13	0	OSTRÉ VRCHOLY	180	3,91	3,33

Naproti tomu (jak ukazuje srovnání v tab. 17), ve všech těchto pokusech a vyhodnoceních (3D struktura povrchu, drsnost povrchu, výkon frézování) zcela zaostávají experimenty obrobené nástrojem bez náklonu.

Dalším bodem této práce je ukázka zpřesnění výpočtu drsnosti obrobeného povrchu pomocí statické rovnice, která vychází z provedených experimentů. Přesnost výpočtu je mnohem vyšší, než výpočet drsnosti založené na pouhé teoretické úvaze (známých vzorců z technologie obrábění), které vychází jen ze znalosti geometrie nástroje a obrobku, která nezohledňuje dynamiku obráběcího procesu. Srovnání přesnosti výpočtu pro příčnou drsnost nástroje s náklonem  $\beta_n = +15^\circ$  udává tabulka 18 a graf č. 7. Přesnost je vyjádřena odchylkou  $\delta$  (procentuální odchylkou vypočítané hodnoty od hodnoty naměřené), vypočítané dle vztahu:

$$\delta = \left| 1 - \frac{R_{zn}}{R_{zv}} \right| \cdot 100 \quad (8.4)$$

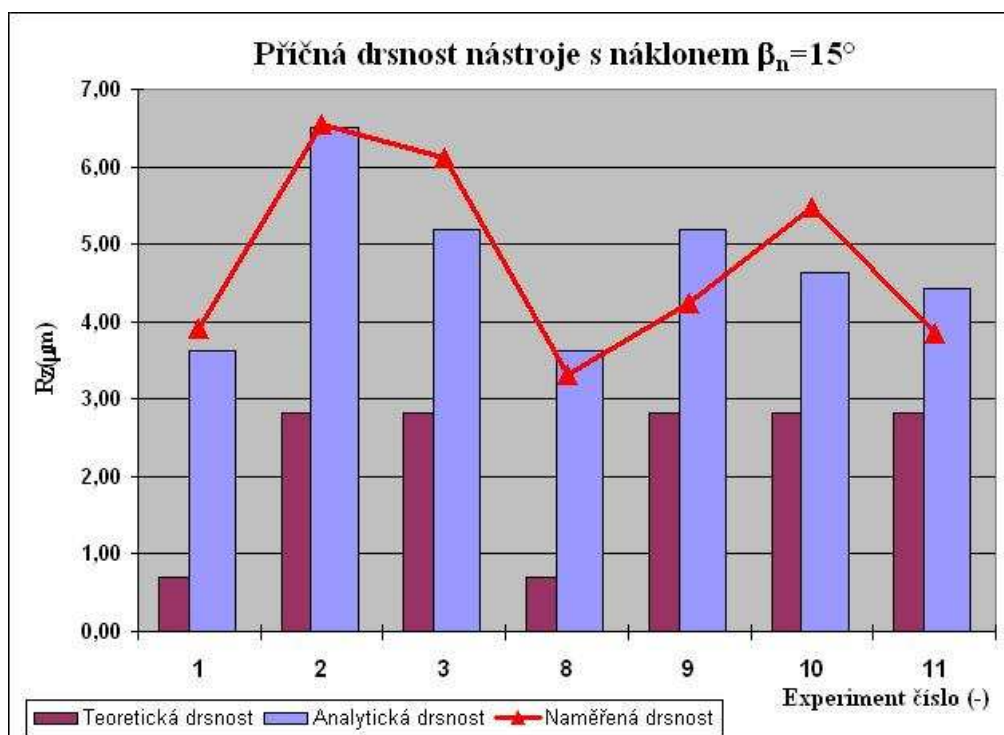
kde:  $\delta$  - procentuální odchylka od naměřené hodnoty [ % ]

$R_{zn}$  – naměřená (skutečná) drsnost [  $\mu\text{m}$  ]

$R_{zv}$  – vypočítaná drsnost [  $\mu\text{m}$  ]

Tabulka č. 18: Porovnání naměřených a vypočítaných hodnot

Plocha	Řezná rychlost	Posuv	Naměřená drsnost $R_z$	Teoretická drsnost	Odchylka	Analytická drsnost	Odchylka
	$v_{cef}$	$f_z$	$R_z$	$R_{ZT}$	$\delta_T$	$R_{ZA}$	$\delta_A$
	( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	(mm)	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	(%)	( $\mu\text{m}$ )	(%)
<b>1</b>	171,3	0,15	3,92	0,70	457	3,62	8
<b>2</b>	171,3	0,3	6,54	2,81	133	6,50	1
<b>3</b>	308,3	0,3	6,11	2,81	117	5,18	18
<b>8</b>	171,3	0,15	3,33	0,70	373	3,62	8
<b>9</b>	308,3	0,3	4,25	2,81	51	5,18	18
<b>10</b>	411,1	0,3	5,48	2,81	95	4,63	18
<b>11</b>	462,5	0,3	3,86	2,81	37	4,43	13



Graf č. 7: Srovnání drsností zjištěné různými metodami

Univerzálnost tohoto postupu dovoluje tvorbu statických rovnic nejen pro parametr drsnosti  $R_z$ , ale i pro ostatní ukazatele jakosti povrchu: parametr  $R_{sk}$ ,  $R_a$  apod. Postup výpočtu může být výchozím bodem pro programování aplikace, která vychází z naměřených hodnot a počítá výsledné vlastnosti povrchu. Jednoduchou aplikaci lze zapsat např. do Excelu (obr. 33). S využitím nástroje Excelu „Řešitel rovnic“ pak není nutné používat program Octave. Jediné, co je potřeba znát, jsou naměřené hodnoty parametru povrchu z provedených experimentů.

Zadej naměřené hodnoty					Mezivýpočet							
Zadej počet měření n	číslo měření n	$v_{cef}$	$f_a$	$R_{zi}$	$\log v_{cef}$	$\log f_a$	$\log R_{zi}$	$(\log v_{cef})^2$	$(\log f_a)^2$	$\log v_{cef} \cdot \log f_a$	$\log R_{zi} \cdot \log v_{cef}$	$\log R_{zi} \cdot \log f_a$
7	1	171,3	0,15	3,92	2,234	-0,824	0,593	4,989	0,679	-1,840	1,324	-0,489
	2	171,3	0,3	6,54	2,234	-0,523	0,816	4,989	0,273	-1,168	1,822	-0,427
	3	308,3	0,3	6,11	2,489	-0,523	0,786	6,195	0,273	-1,301	1,956	-0,411
	8	171,3	0,15	3,33	2,234	-0,824	0,522	4,989	0,679	-1,840	1,166	-0,430
	9	308,3	0,3	4,25	2,489	-0,523	0,628	6,195	0,273	-1,301	1,564	-0,329
	10	411,1	0,3	5,48	2,614	-0,523	0,739	6,833	0,273	-1,367	1,932	-0,386
	11	462,5	0,3	3,86	2,665	-0,523	0,586	7,103	0,273	-1,394	1,563	-0,307
	$\Sigma$	2004	1,80	33,48	16,958	-4,262	4,670	41,294	2,725	-10,212	11,327	-2,777

Soustava rovnic - matice				Doplň výsledky z Octave			Výsledná $R_z$		
7	-4,262	16,958	4,670	$\log C_{Rz}$	$X_{Rz}$	$Y_{Rz}$	$C_{Rz}$	$X_{Rz}$	$Y_{Rz}$
16,958	-10,212	41,294	11,327				131,9	0,84662	-0,38709
-4,262	2,725	-10,212	-2,777						

Výpočetní tabulka		
Zadej posuv $f_z$	Zadej reznou rychlost $v_{re}$	Výsledná $R_z$
0,3	450	4,47

Obr. 33: Ukázka softwaru v tabulkovém editoru, využívající vytvořených strukturních rovnic

Pro aplikaci této početní metody a využití poznatků v praxi, lze doporučit provádět další experimenty s tímto zaměřením:

- Vzhledem k výhodným vlastnostem drsnosti obrobeného povrchu realizovat budoucí experimenty s náklonem nástroje  $\beta_n = +15^\circ$  [2].
- Vzhledem k ekonomickým a kvalitativním výhodám obrobeného povrchu orientovat provozní režim dalších experimentů do sekce HSC a HSM obrábění.
- Zaměřit se na prozkoumání vnitřních pnutí v obrobené vrstvě každého experimentu.
- Pro tvorbu strukturních rovnic vycházet z většího souboru experimentů.

## 9 Závěr

Vzhledem k dosažené drsnosti je frézování nakloněným nástrojem v režimu HSM podstatně výhodnější, než klasické konvenční frézování s nástrojem bez náklonu. Stejně výhodné je toto frézování i z hlediska ekonomického, kde režimem HSM jsme schopni vyrábět plochy vyšší jakosti (minimálně však jakosti srovnatelné s konvenčním obráběním), ale 30x rychleji, což v první řadě ovlivňuje cenu výroby.

Dále byl odvozen univerzální postup pro výpočet drsnosti plochy obrobené frézováním, vycházející z praktických měření parametrů plochy. Tento vztah využívá experimentálních pokusů které potvrdily, že drsnost stanovená teoretickým výpočtem (ze známé geometrie nástroje, obráběné plochy, polohy ustavení nástroje vůči obrobku a technologických podmínek) není zcela objektivní.

Takovéto odvození a výslednou rovnici je možné zakomponovat do softwarových programů využívající počítačovou simulaci obrábění. Jako přídatný modul pro výpočet jakosti obrobené plochy vycházející z praktických poznatků může najít uplatnění v celé řadě dnes užívaných CAD/CAM systémů.

Současně je nutné si uvědomit, že jakost obrobené vrstvy byla posuzována pouze metodou měření drsnosti povrchu a optickým sledováním. Je tedy nutné kvalitu vrstvy, obrobené frézováním s nakloněným nástrojem, podrobit dalšímu zkoumání, které by potvrdilo (případně vyvrátilo) další výhodné vlastnosti obrobené plochy vytvořené touto metodou obrábění. Jedná se především o zkoumání vnitřních (zbytkových) napětí v povrchové vrstvě. Pokud se i v tomto směru potvrdí výhody této metody, můžeme hovořit o velice vhodné technologii obrábění a kvalitním povrchu, předurčující dlouhou životnost.

## 10 Související dokumenty

- [1] *Ball nose milling- image*. URL: <[img.directindustry.com](http://img.directindustry.com)> [cit. 2010-5-3]
- [2] SADÍLEK, M.; ČEP R.; OTÁHAL, D. *Vliv náklonu nástroje při frézování*. Odborná konference - Frézování IV. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2007, s. 13 – 18. ISBN 80-214-3239-X.
- [3] *Frézovací nástroje*. URL: <<http://www.zps-fn.cz/>> [cit. 2010-5-3]
- [4] *Frézovací nástroj s vyměnitelnými destičkami*.  
URL: <<http://news.thomasnet.com/images/large/451/451470.jpg>> [cit. 2010-5-3]
- [5] *Frézovací nástroj s vyměnitelnou břitovou destičkou*.  
URL: <<http://www.leshowe.com/dapra/cutting/ballnose/images/metric-bn-collage.jpg>> [cit. 2010-5-3]
- [6] *Fette - Katalog frézovacích nástrojů*.  
URL: <[http://fette.netdirect.cz/files/Katalog\\_Fraesen.pdf](http://fette.netdirect.cz/files/Katalog_Fraesen.pdf)> [cit. 2010-5-3]
- [7] SEJKORA, J. *Frézování tvarových ploch s ohledem na strukturu povrchu*. Ostrava: Vysoká škola báňská. Fakulta strojní. Katedra obrábění a montáže, 2006. 34 s., 3 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Sadílek, M., Ph.D.
- [8] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. Žilina: EDIS Žilina. 2007, 243 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [9] HOBSON, T. *3D hodnocení textury povrchu v praxi*. MM Průmyslové spektrum [on-line]. 2006, č. 7, s. 24 [cit. 2010-5-3]. Dostupné z URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/3d-hodnoceni-textury-povrchu-v-praxi>>
- [10] *Vady povrchu tvářecí formy*.  
URL: <[http://www.pkn.co.za/pap-PWPGL\\_files/image005.gif](http://www.pkn.co.za/pap-PWPGL_files/image005.gif)> [cit. 2010-5-3]

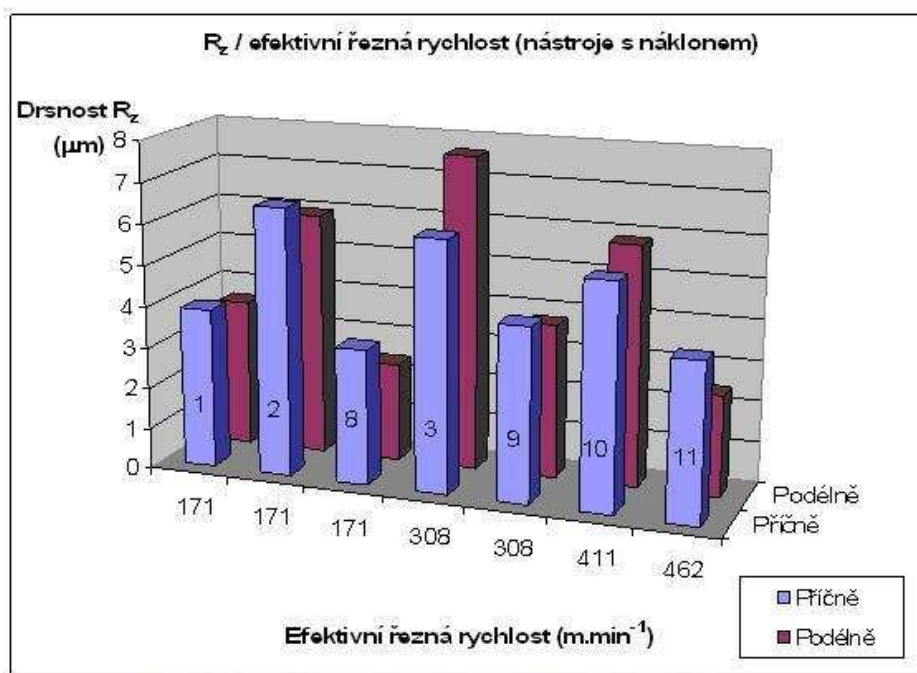
- [11] MATHESIUŠOVÁ, R. *Úpravy povrchů pro aplikace v jaderné energetice*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní, 2009. SVOČ, s. 8. Dostupné z URL:<[http://old.fst.zcu.cz/\\_files\\_web\\_FST/\\_SP\\_FST\(SVOC\)/\\_2009/\\_sbornik/PapersPdf/Bc/Mathesiusova\\_Renata.pdf](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2009/_sbornik/PapersPdf/Bc/Mathesiusova_Renata.pdf)> [cit. 2010-5-3]
- [12] NOVÁK, Z. *Moderní výkonné frézovací nástroje*. MM Průmyslové spektrum [on-line]. 2008, č. 5, s. 28 [cit. 2010-5-3]. Dostupné z URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-vykonne-frezovaci-nastroje-2>>
- [13] ŠKABRAHA, S. *Obrábění kalených materiálů řeznou keramikou*. MM Průmyslové spektrum [on-line]. 2008, č. 12, s. 30 [cit. 2010-5-3]. Dostupné z URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kalenych-materialu-reznou-keramikou>>
- [14] KOČMAN, K.; PROKOP, J.; KOČMANOVÁ, A. *Ekologické a technologické aspekty HSC obrábění*. MM Průmyslové spektrum [on-line]. 2001, č. 6, s. 54 [cit. 2010-5-3]. Dostupné z URL:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/ekologicke-a-technologicke-aspekty-hsc-obrabeni>>
- [15] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění*. Skripta – I. vydání. Ostrava: Vysoká škola Báňská. Fakulta strojní, 2009, s. 146. ISBN 80-214-3239-X.
- [16] *Nástroje pro EDM obrábění*. URL: <[www.erodatools.co.uk](http://www.erodatools.co.uk)> [cit. 2010-5-3]
- [17] PENTA Trading s.r.o. – elektroerozivní obráběcí centra URL:<<http://www.penta-edm.cz/>> [cit. 2010-5-3]
- [18] BUMBÁLEK, B. *Integrita povrchu a její význam pro posouzení vhodnosti dané plochy pro její funkci*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, prosinec 2005, s. 6. Dostupné z URL:<[http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/2512\\_Bumbalek.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2512_Bumbalek.pdf)> [cit. 2010-5-3]
- [19] KOLAŘÍK, K.; GANEV, N.; BARCAL, J. *Analýza zbytkové napjatosti vysokopevnostní slitiny INCONEL 718 po elektroerozivním obrábění*. Materials Structure [on-line]. 2005, č. 2, s. 98-102 [cit. 2010-5-3]. Dostupné z URL:<<http://www.xray.cz/ms/bul2005-2/kolarik.pdf>>

- [20] *Obráběcí centrum DMU 60*. URL: <[www.spsnmnv.sk](http://www.spsnmnv.sk)> [cit. 2010-5-3]
  
- [21] *DMG Brno – Obráběcí centrum DMU 60*  
URL:<<http://www.dmgbrno.cz/en,milling,dmu60monoBLOCKnd?opendocument>> [cit. 2010-5-3]
  
- [22] *Obráběcí centrum Mikron XSM 800*. URL: <[www.gfac.com](http://www.gfac.com)> [cit. 2010-5-3]
  
- [23] *Obráběcí centrum Mikron XSM 800 – Parametry*.  
URL:<<http://www.gfac.com/cz/produkty/vysokorychlostni-obrabeci-centra/xsm/mikron-xsm-800.html>> [cit. 2010-5-3]
  
- [24] *Bohdan Bolzano s.r.o. – Přehled materiálových značek a jejich charakteristika*  
URL:<<http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastr-ojovky/zastudena/legovane/prehled/>> [cit. 2010-5-3]
  
- [25] *Janků – nástrojové oceli*. Materiálový list oceli 1.2379.  
URL:<<http://www.nastrojove-oceli.com/tu/1.2379.pdf>> [cit. 2010-5-3]
  
- [26] *Obrábění povrchu čelní frézou*. (editováno)  
URL: <[http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/22/2212\\_big.jpg](http://www.mmspektrum.com/multimedia/image/22/2212_big.jpg)> [cit. 2010-5-3]
  
- [27] KOVAŘÍK, M. *Vliv řezných podmínek na teplotu řezné hrany při soustružení oceli*. Ostrava: Vysoká škola báňská. Fakulta strojní. Katedra obrábění a montáže, 2008. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Vlček, M.
  
- [28] PAVLICA, L. *Měření teplot při HSC frézování kulovou frézou*. Ostrava: Vysoká škola báňská. Fakulta strojní. Katedra obrábění a montáže, 2007. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vlček, M.
  
- [29] *Matematický software Octave, ver. 2.1.50*  
URL:<<http://www.octave.cz/pages/install.html>> [cit. 2010-5-3]

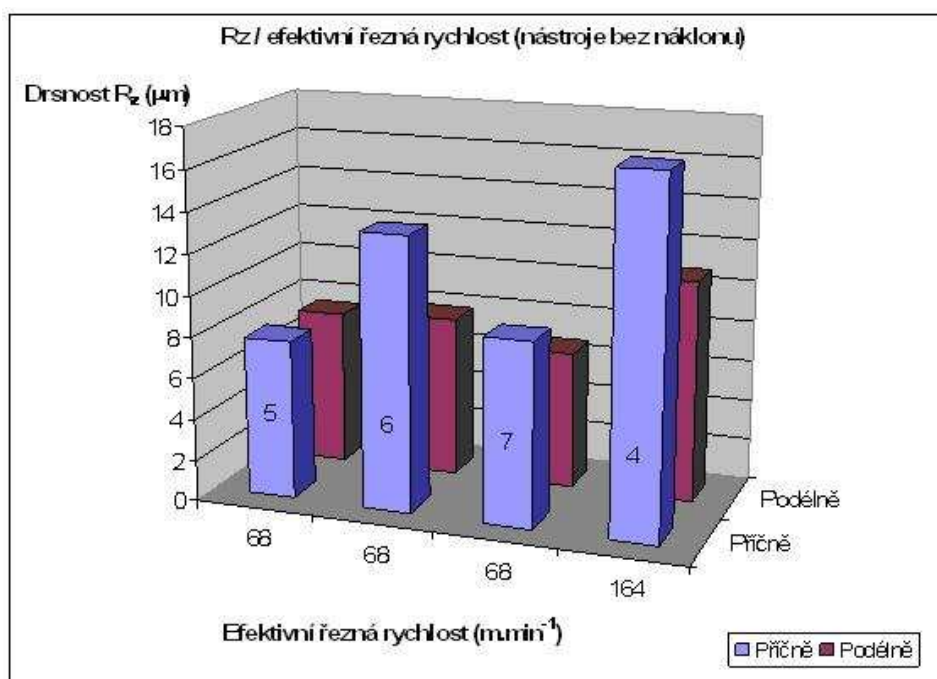


## 11 Přílohy

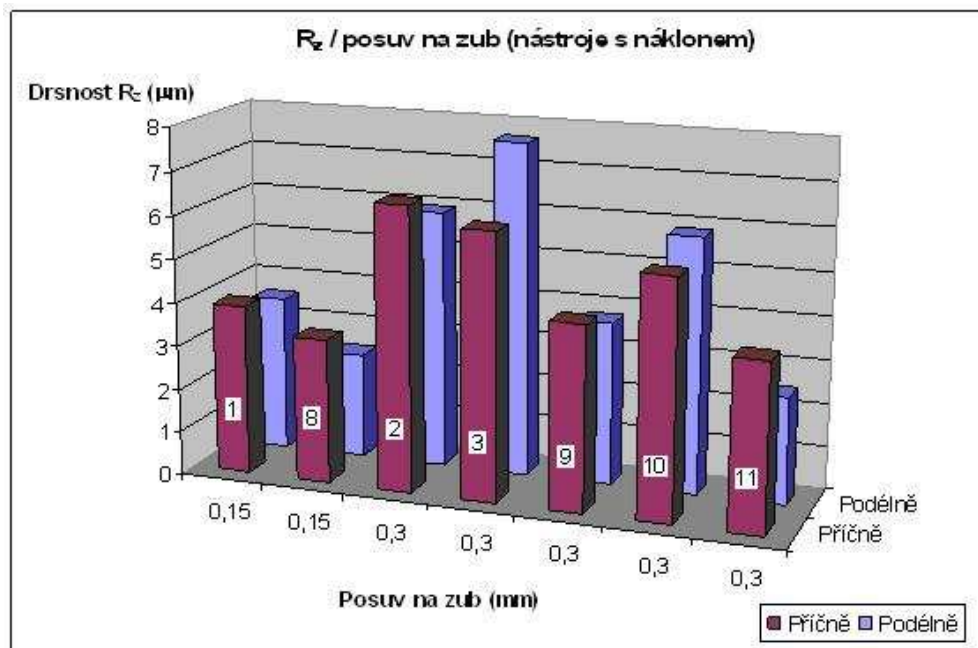
Příloha č. 1: Parametr drsnosti  $R_z$  (ploch s náklonem nástroje  $\beta = 15^\circ$ ,  $d = 8 \text{ mm}$ ),  
vzhledem k efektivní řezné rychlosti



Příloha č. 2: Parametr drsnosti  $R_z$  (ploch bez náklonu nástroje  $\beta = 0^\circ$ ,  $d = 8 \text{ mm}$ ),  
vzhledem k efektivní řezné rychlosti



Příloha č. 3: Parametr drsnosti  $R_z$  ( ploch s náklonem nástroje  $\beta = 15^\circ$ ,  $d = 8 \text{ mm}$ )  
vzhledem k posuvu na zub  $f_z$



Příloha č. 4: Parametr drsnosti  $R_z$  ( ploch bez náklonu nástroje  $\beta = 0^\circ$ ,  $d = 8 \text{ mm}$ )  
vzhledem k posuvu na zub  $f_z$

